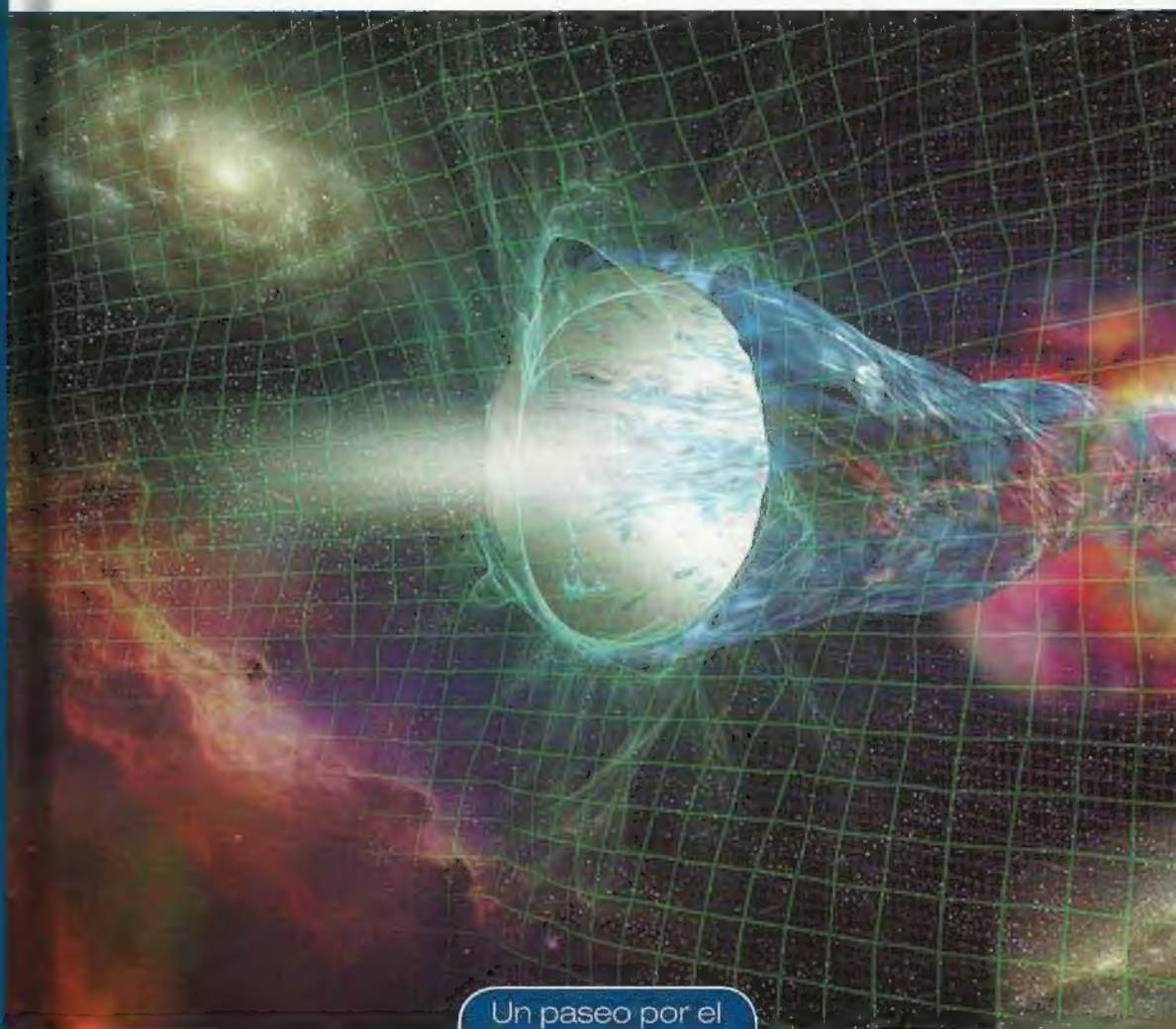


# Universos paralelos

Realidades múltiples  
y dimensiones ocultas



Un paseo por el  
**COSMOS**



The Doctor y La Comunidad

Redigitalización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoeau.blogspot.com/>

# Universos paralelos

Realidades múltiples  
y dimensiones ocultas

RBA

*Imagen de cubierta:* Representación artística de un «agujero de gusanos», es decir, un agujero negro cuyos extremos están situados en puntos muy distantes del universo o incluso en universos distintos.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© José Rodríguez-Quintero por el texto  
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.  
© 2015, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan; Antonio Muñoz: 120-121.

Fotografías: Archivo RBA: 53a, 83ai, 83ad; William Blake Archive: 83b; Edward Elrick: 53b; NASA/JPL-Caltech: 106-107; NASA/WMAP Science Team: 73, 116; D. van Ravenswaay/Science Photo Library/Age Fotostock: 134-135; Science Photo Library/Age Fotostock: 105b; Georg Wiora/CC BY-SA 2.5: 103.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8305-4  
Depósito legal: B-16877-2015

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)  
Impreso en España - Printed in Spain

## SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1	Un mundo de probabilidades 13
CAPÍTULO 2	Muchos mundos sin probabilidad 43
CAPÍTULO 3	Mundos probables 75
CAPÍTULO 4	Un mundo improbable 111
LECTURAS RECOMENDADAS	145
ÍNDICE	147



La idea de la existencia de múltiples universos o realidades paralelas, más o menos accesibles o desconectadas de la nuestra, se ha instalado en el imaginario colectivo reciente. Son múltiples las referencias a esta idea que se han ido destilando, desde mediados del siglo xx, en manifestaciones culturales diversas, como la literatura, el cine y la novela gráfica o el cómic. Cualquier fan de los superheroicos personajes de las conocidas editoriales Marvel o DC está familiarizado con la existencia, en la ficción, de mundos paralelos que albergan copias idénticas o exóticas de estos personajes, o portales interdimensionales que los transportan a otras realidades. ¿Son las ideas subyacentes solo ficción? ¿Qué grado de verosimilitud les concede la física moderna? ¿Pueden la mecánica cuántica o la cosmología moderna proporcionar una base científica firme para la idea de que, en algún otro universo, se desarrolla una realidad idéntica a la que nosotros podemos constatar aquí y ahora? El objeto de este libro es, precisamente, ocuparse de estas preguntas con todo el rigor y la honestidad que deben caracterizar a un análisis hecho desde el ámbito de la ciencia. Este propósito nos embarcará en un apasionante viaje por el vasto panorama de las ideas y teorías



físicas que han revolucionado nuestra visión del universo y nuestro concepto de la realidad.

Algunas especulaciones teóricas en el ámbito de la física moderna abren hoy la puerta a la posible coexistencia de nuestro universo, como parte de una realidad múltiple, con otros muchos universos. El conjunto de estos múltiples universos es comúnmente denominado *multiverso* y, a lo largo del último medio siglo, han sido postulados multiversos de diferente tipo y naturaleza. Las especulaciones que han llevado a físicos teóricos y cosmólogos a postularlos se han centrado fundamentalmente en interpretaciones de la mecánica cuántica, en variantes del paradigma cosmológico dominante, basado en la teoría del *Big Bang* (Gran Explosión), y en la *teoría de cuerdas*, que ha sido concebida como marco para la unificación de la gravedad y las restantes interacciones fundamentales integradas en el llamado *modelo estándar* de la física de partículas elementales. Estos universos múltiples surgen de elucubraciones formales que, ancladas al sofisticado andamiaje matemático de las teorías físicas fundamentales, persiguen generalmente la consistencia interna y la «elegancia». No obstante, es tal el éxito de estas teorías, en su propósito de describir el mundo físico que nos rodea, que merece la pena no desdeñar las consecuencias que puedan extraerse de ellas, o de su estructura matemática, por poco cercanas a la lógica cotidiana que nos puedan resultar.

La mecánica cuántica o la teoría especial de la relatividad, a principios del siglo pasado, revolucionaron completamente nuestra percepción del mundo físico, desafiando al sentido común y enterrando las nociones de determinismo y simultaneidad, y hasta sus más inverosímiles consecuencias han demostrado ser compatibles con los resultados experimentales más elaborados y cuidadosamente obtenidos. Ambas, combinadas con la teoría de campos, son la base de la asombrosamente precisa descripción moderna de la interacción electromagnética entre partículas elementales, como los electrones y los protones: la *electrodinámica cuántica*. Analogías de esta última, basadas en extensiones de la estructura matemática de la teoría, se han aplicado con éxito a la descripción de las interacciones nuclea-

res débil y fuerte, completando el edificio teórico del modelo estándar, que ha sido repetidamente contrastado con éxito por multitud de experimentos, como los realizados en el CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear) en los últimos treinta años.

La teoría general de la relatividad supuso una reformulación de la interacción gravitatoria, extendiendo la noción concebida por Newton y ofreciendo singulares predicciones que han sido experimentalmente verificadas. Ha proporcionado, además, la base matemática para la teoría del Big Bang y para la cosmología moderna.

Exigir a la interacción gravitatoria la misma estructura matemática que las otras tres interacciones del modelo estándar (electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil), integrándolas a todas en una teoría «del todo», conduce a la *teoría de cuerdas*, con sus diferentes versiones y variantes, y a la concepción de un espacio-tiempo multidimensional.

La existencia de multiversos es una posibilidad que se deriva de la estructura matemática de estas teorías físicas y, consecuentemente, merece interés, rigurosa atención y, si es posible, el escrutinio de la observación y el experimento. Sin esto último, el multiverso no dejará de ser una interesante curiosidad matemática o una controvertida especulación de carácter metafísico propiciada por nuestra comprensión formal de la realidad. De hecho, uno de los principales argumentos que apoyarían su existencia tiene un claro acento metafísico: el principio antrópico aplicado a resolver la paradoja cosmológica del *ajuste fino*. Dicha paradoja se refiere a la singular circunstancia de que algunos «parámetros» físicos parecen delicadamente «ajustados» para propiciar un universo apto para la vida. En nuestra comprensión actual de las leyes fundamentales de la física, estas aparecen asociadas a ciertas simetrías cuya rotura determina el valor de estos parámetros. Si el proceso de rotura de simetría es aleatorio, el nuestro, con sus leyes físicas y sus parámetros, es un universo muy improbable. La existencia de una miríada de universos distintos, con diferentes y variadas configuraciones de estos parámetros, integrados en algún tipo de multiverso,



ofrecería una salida al embarazoso problema de la improbabilidad del nuestro. Solo aquellos universos con configuraciones de parámetros compatibles con formas de vida, por improbables que sean, pueden ser estudiados por aquellas formas de vida que estén dotadas de inteligencia y destreza matemática.

El cosmólogo de origen sueco Max Tegmark ha propuesto una suerte de taxonomía que tiene como objeto clasificar las diferentes versiones posibles de multiversos, propuestos hasta ahora o que puedan ser potencialmente propuestos en el futuro. El resultado son cuatro clases jerarquizadas de multiversos, construidas como muñecas rusas, o sea albergando una clase dentro de otra más amplia, esta a su vez dentro de otra mayor y así sucesivamente. Esta clasificación nos servirá para abordar de manera ordenada, a lo largo del libro, las diferentes nociones de multiverso, la base científica que los sustenta y sus principales implicaciones.

La clase I de multiversos es la más cercana a la lógica cotidiana. En ella encajaría un universo espacialmente infinito y homogéneo a gran escala, compuesto por infinidad de «universos-isla» o «mundos» que han evolucionado de manera aislada en un tiempo finito. En él, sin necesidad de recurrir a las inquietantes leyes de la mecánica cuántica, la pura y simple probabilidad nos aseguraría que, dentro de esa infinidad, otros mundos habrían evolucionado hasta repetir el nuestro, en su estado actual. Como discutiremos, dentro del paradigma cosmológico actual, que incluye la inflación cósmica, los datos obtenidos para las fluctuaciones de temperatura del fondo cósmico de microondas son compatibles con la existencia de este tipo de multiverso.

Las leyes de la física no variarían de un universo a otro en un multiverso de clase I. Un multiverso de clase II, sin embargo, sería aquel constituido por múltiples universos con leyes y constantes físicas fundamentales que diferirían de unos a otros. Cada uno de esos universos podría ser, a su vez, un multiverso de la clase I, si reuniera condiciones para ello. La clase III de multiverso es la que podríamos denominar *multiverso cuántico*. En ella encajaría la propuesta defendida por el físico Hugh Everett en su tesis doctoral de 1957, según la cual el engorroso postulado del colapso de

la función de onda en el proceso de medida, formulado *ex profeso* para dotar de predictibilidad a la mecánica cuántica, es solo necesario para ahorrar la descripción cuántica de la realidad a la perspectiva única de cada observador. Así, como analizaremos en detalle, Everett sugirió que observador y sistema físico observado se entrelazaban durante el proceso de medida, y la realidad se desdoblaba con cada posible alternativa cuántica, generando múltiples historias que se desarrollaban en universos paralelos. Por último, Tegmark incluyó también una clase IV de multiversos que escapa, claramente, al ámbito de cualquier discusión científica, quedando en el plano de la abstracción matemática o de la pura metafísica. La sugerencia de la existencia de esta última clase, de hecho, podría ser considerada como una actualización del paradigma platónico. Estaría compuesta por universos construidos con cualquier estructura matemática imaginable que, desde una perspectiva platónica radical, serían la verdadera realidad y existirían en sentido físico. Esta idea justificaría la sorprendente correspondencia entre matemática y realidad física que, desde Galileo, ha perturbado a físicos y matemáticos a lo largo de más de cuatrocientos años. ¿Es la matemática el lenguaje en el que la naturaleza se expresa, o es simplemente una extraordinaria y eficaz herramienta desarrollada por el cerebro humano para aproximarnos a la realidad natural? Complejísticas y nada intuitivas abstracciones matemáticas en el campo de la geometría, el análisis o el álgebra se han adaptado maravillosamente bien al propósito de formular las leyes que gobiernan la realidad física, que parecen sustentar la primera de las alternativas. Tegmark abunda en ello, con esta última clase de multiversos, y responde al filósofo Ludwig Wittgenstein que, sobre la matemática y el mundo, afirmaría en su *Tractatus logico-philosophicus* que la primera «no dice nada del mundo, existiendo en cualquier mundo posible o, incluso, aunque no hubiera mundo». Para Tegmark, el mundo, cualquier mundo posible, existirá porque existe la matemática. Esta última clase de multiversos, mencionada aquí por completitud, no será objeto de análisis en el presente libro, que está enfocado a discutir la verosimilitud del multiverso cuántico y de las variantes cosmológicas que encajan en las clases I y II.



Una última cuestión que merece, al menos, alguna atención antes de cerrar esta introducción es la que se refiere a la búsqueda de posibles evidencias empíricas para la existencia de multiversos. Como hemos mencionado, han sido mayormente postulados para preservar la estructura matemática, o como posibilidad consistente, de las teorías físicas fundamentales. Pero ¿puede ser contrastada o refutada su existencia? La pregunta es, en sí misma, controvertida. En algunos casos, como ocurre para los multiversos de clase I, diferentes burbujas de Hubble podrían llegar a interactuar, propiciando un efecto medible. También universos confinados en diferentes hipersuperficies del mismo continuo espacial proclamado por la teoría de cuerdas podrían interactuar, con efectos potencialmente observables. Por otra parte, las condiciones exigibles para la existencia de ciertos tipos de multiversos, sobre las que hablaremos en profundidad, como la preservación de una propiedad de los procesos mecano-cuánticos denominada *unitariedad* o la curvatura negativa o nula para la geometría del universo en relatividad general, pueden ser estudiadas de manera experimental y propiciar alguna suerte de refutación. La tarea es, en cualquier caso, ardua y solo muy remotamente fructífera.

## Un mundo de probabilidades

La mecánica cuántica, en el primer cuarto del siglo XX, enterró la visión determinista de la física clásica y consagró un mundo de saltos y probabilidades en el que tienen cabida los muchos universos que propuso Hugh Everett.

Corrían los últimos días del siglo XIX cuando un físico alemán, que ya gozaba de una bien ganada reputación dentro de la comunidad científica internacional por sus trabajos sobre la teoría del calor y sobre termodinámica en general, presentó un trabajo sobre la distribución espectral de la radiación térmica en la reunión anual de la Sociedad Alemana de Física. La traducción del título del trabajo era «La teoría de la ley de distribución de energías del espectro normal», el físico era Max Planck y en aquella fecha, el 14 de diciembre de 1900, se presentó en sociedad la que sería la primera piedra de la primera gran revolución de la física moderna: la hipótesis cuántica.

A lo largo del primer cuarto del siglo siguiente, reconocidos físicos como, entre otros, Albert Einstein, Niels Bohr, Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Max Born, Wolfgang Pauli o Erwin Schrödinger, pusieron otras muchas piedras que permitieron completar un singular y brillante edificio: la mecánica cuántica. Sus leyes se revelaron tan eficaces y precisas para la descripción del mundo microscópico como inquietantes y desconcertantes para la intuición del común de los mortales. La luz tenía propiedades corpusculares, la materia propiedades ondulatorias, los



electrones ya no seguían trayectorias y determinar su posición implicaba desconocer la velocidad que poseían; y, sobre todo, un gato podía estar vivo y muerto al mismo tiempo! Esas mismas leyes y su consistencia matemática constituyen la principal base científica para la sorprendente especulación formulada por Hugh Everett en su tesis doctoral, defendida en Princeton en 1957, y que proponía la existencia de una multitud de universos paralelos, lo que se denomina *multiverso cuántico* o simplemente *multiverso*, como peaje a pagar para preservar una propiedad de la mecánica cuántica llamada *unitariedad* (a la que prestaremos atención más adelante). En particular, dicha propiedad debía preservarse también cuando se realiza una medición de alguna característica observable para un sistema dado y la función de onda que lo representa, aparentemente, colapsa perdiendo parte de su información.

En esencia, el trabajo de Everett estaba motivado, precisamente, por el intento de resolver el conocido como *problema de la medida* en mecánica cuántica. Problema que se deriva del establecimiento de la denominada *interpretación ortodoxa de Copenhague* como paradigma de la mecánica cuántica para la descripción del mundo físico microscópico. Everett concibió un mundo cuántico en el que la función de onda no colapsaba y la información del sistema cuántico no se perdía. En este mundo, el sistema cuántico con un resultado particular de una medida y el observador que la había medido se desdoblaban del sistema con otros resultados y de otros observadores, generando realidades cuánticas alternativas que se desconectaban y evolucionaban en paralelo. Así, el proceso de medida multiplicaba la realidad hasta generar tantas versiones cuánticas de la misma como resultados posibles de cada medida. Mundos paralelos que surgían de cada alternativa cuántica, que diferían inicialmente en el resultado de una medida concreta, pero que continuaban desdoblándose y divergiendo con cada alternativa medida. Las implicaciones de la idea de Everett producen verdadero vértigo: la existencia de una infinidad de realidades paralelas, que han aparecido desde el principio de los tiempos y siguen continuamente apareciendo, desarrollando todas las historias posibles.

No obstante, a pesar del equipaje metafísico que acompaña al trabajo de Everett, el suyo es un trabajo muy técnico, marcadamente formal y sólidamente matemático. Lo que Everett propone es, a grandes rasgos, una alternativa al paradigma de la interpretación ortodoxa de Copenhague, que extiende el formalismo de la mecánica cuántica y resuelve la paradoja asociada al problema de la medida. La existencia de múltiples realidades paralelas, de múltiples universos, es una mera consecuencia de la extensión sugerida por Everett, de su interpretación alternativa de la mecánica cuántica. Entender el porqué y las consecuencias de las ideas de Everett nos llevará, por tanto, a realizar un recorrido conceptual a lo largo de la gestación de las leyes de la mecánica cuántica y del establecimiento de la interpretación ortodoxa de Copenhague.

## DEL CUERPO NEGRO A LA CUANTIZACIÓN DE LA LUZ

El problema físico que llevó a Planck a postular su hipótesis cuántica era el problema del equilibrio de la materia con la radiación. Un problema en el que conflúan la termodinámica, la mecánica estadística y el electromagnetismo. Disciplinas, todas, muy bien establecidas dentro del cuerpo de la física clásica a finales del siglo xx; en particular gracias a los trabajos de Ludwig Boltzmann en mecánica estadística y de James Clerk Maxwell en la formulación unificada del electromagnetismo.

El problema puede describirse como sigue. Todo cuerpo, por el hecho de estar a una cierta temperatura, radia. Emite «luz», es decir, radiación electromagnética no necesariamente visible. La razón es fácil de entender. La materia se compone de moléculas, que a su vez se componen de átomos que, aunque neutros, están compuestos por partículas cargadas eléctricamente como los electrones y los protones. El origen de las propias fuerzas intermoleculares está en el hecho de que, en las moléculas, la distribución de carga eléctrica negativa no es igual a la positiva, existiendo cierta separación de carga, ya sea permanente o instantáneamente. Por otra parte, la mecánica estadística nos enseña que la temperatura de un cuerpo es una medida promedio



Pasé diez años de mi vida probando la ecuación de Einstein de 1905, y contra mis expectativas, en 1915 tuve que sostener su clara verificación a pesar de su irracionalidad.

ROBERT MILLIKAN

néticos y eléctricos variables, es decir ondas electromagnéticas. Esto es lo que se conoce como *radiación térmica*. La cantidad total de energía radiada por unidad de tiempo y unidad de superficie del cuerpo que radia, denominada *radiancia*, debe lógicamente depender del grado de agitación y, por tanto, de la temperatura a la que se encuentre dicho cuerpo. La manera en que esa energía se reparte en el continuo de frecuencias del espectro electromagnético, que viene dada por la función llamada *radiancia espectral*, también dependerá de la temperatura.

Con objeto de analizar los problemas con la máxima generalidad y de la manera más formal posible, los físicos suelen fabricar modelos que se aplican a sistemas idealizados. En el caso del problema del equilibrio entre materia y radiación, ese sistema idealizado se llama *cuerpo negro*, denominado así porque su superficie absorbe toda la radiación que incide sobre él. La principal característica de un cuerpo negro es que, como Gustav Kirchhoff demostró, la manera en que radia térmicamente no depende de su naturaleza o composición, sino solo de la temperatura del cuerpo. Una buena aproximación experimental de un cuerpo negro es una cavidad mantenida a temperatura constante, cuya radiación interior se observa a través de un pequeño orificio. De ese modo, el problema de la radiación del cuerpo negro adquirió también una notable relevancia práctica al convertirse este en un patrón ideal para fuentes luminosas. Científicos e ingenieros, a lo largo de la segunda mitad del siglo XIX, repitieron cuidadosamente medidas de la distribución espectral de la radiación del cuerpo negro y trataron, sin éxito, de justificarlas de manera teórica. En particular, en contra de cualquier evidencia

de la agitación de las moléculas que lo forman, cuando este se halla en equilibrio termodinámico (es decir, cuando se encuentra en equilibrio mecánico, químico y térmico a la vez y no puede experimentar un cambio de estado de manera espontánea). Y el electromagnetismo de esta agitación de componentes cargados genera campos mag-

experimental, la radiancia espectral calculada teóricamente crecía hasta hacerse infinita cuando lo hacía la frecuencia. Dicho desacuerdo radical entre teoría y experiencia (la radiancia espectral medida disminuía hasta anularse para el caso límite de frecuencias infinitas) fue melodramáticamente bautizado como *catástrofe ultravioleta*.

El problema era, por tanto, de capital importancia porque ponía a prueba el paradigma del conocimiento sólidamente establecido para el mundo físico a finales del siglo XIX. Planck atacó ese problema con la certeza de que tenía que ser resuelto y, usando sus mismas palabras, lo resolvió con un «acto de desesperación», formulando su postulado limitado o cuántico. En esencia, la teoría de Planck del cuerpo negro corregía la fallida teoría clásica, previamente desarrollada por lord Rayleigh y sir James Jeans, en un único punto. Como ellos, Planck aplicó el electromagnetismo clásico para deducir que la radiación en el interior del cuerpo negro, de paredes supuestamente metálicas, correspondía a ondas estacionarias con nodos (puntos en los que la amplitud de la onda es nula) en las paredes. Calculó el número de ondas estacionarias por intervalo de frecuencia, también como Rayleigh y Jeans, pero al asignar la energía promedio por onda, introdujo su hipótesis: la energía portada por la radiación interna del cuerpo negro para una frecuencia dada es un múltiplo entero de una cantidad mínima proporcional a dicha frecuencia. Formulada matemáticamente, la hipótesis de Planck se expresa a través de la conocida ecuación:

$$E = h\nu,$$

donde  $E$  representa la energía,  $\nu$ , la frecuencia, y  $h$  es una constante que tiene las dimensiones de una energía multiplicada por un tiempo, magnitud que los físicos conocen como *acción*. Esta constante resultó ser universal, la misma para cualquier forma de interacción entre radiación y materia, y hoy lleva el nombre de *constante de Planck*. De ese modo, con esta hipótesis



señalla pero nada previsible desde la lógica cotidiana, la energía promedio por onda estacionaria pasaba a ser una función de la frecuencia y permitía la descripción precisa de los resultados empíricos para la radiación del cuerpo negro.

A este fenómeno, al hecho de que una magnitud que clásicamente puede variar de manera continua, adquiriendo cualquier valor posible, quede limitada a un conjunto discreto de valores accesibles, se le conoce como *cuantización*. Por «discreto» se entiende que el conjunto de valores es numerable, es decir, que puede establecerse una correspondencia uno a uno con el conjunto matemático de los números naturales o enteros. Planck había introducido, con su hipótesis, la cuantización de la energía de radiación del cuerpo negro. Sin embargo, su interpretación inicial tenía repercusiones más bien modestas. Propuso que las ondas estacionarias en el interior del cuerpo negro estaban acopladas a los electrones que oscilaban en las paredes metálicas de la cavidad, de forma que eran estos electrones oscilantes los que estaban *cuantizados*, provocando que la radiación interna en la cavidad transmitiera energía tan solo en paquetes discretos. Por tanto, para Planck, al menos inicialmente, el fenómeno no era universal.

La universalización del carácter cuántico de la radiación llegó con trabajos posteriores de otros físicos más jóvenes, como Albert Einstein. En su *annus mirabilis* de 1905, Einstein publicó en los *Anales de la Sociedad Alemana de Física* un trabajo titulado «De un punto de vista heurístico sobre la producción y transformación de la luz». En él extendía la hipótesis cuántica de Planck a todo intercambio de energía entre radiación electromagnética y materia, explicando así el conocido como *efecto fotoeléctrico*. Descubierta por Heinrich Hertz en 1886, el fenómeno consistía en la obtención de una corriente eléctrica al hacer incidir luz sobre la superficie limpia de un metal. La luz arrancaba los electrones de la banda de conducción del metal, generando la corriente, pero solo a partir de una cierta frecuencia umbral. Einstein interpretó correctamente que, si la luz solo podía transferirse en paquetes discretos cuya energía era igual al producto de la constante de Planck por la frecuencia, se necesitaría una frecuencia

mínima para que la energía comunicada al electrón por un único paquete elemental fuera suficiente para arrancarlo. A ese paquete elemental se le dio el nombre de *cuanto*, en este caso de luz.

No se trataba solo de la radiación del cuerpo negro; cualquier forma de radiación electromagnética estaba cuantizada. La luz, que se propagaba como la onda electromagnética que era, se transfería en paquetes discretos y también tenía, por tanto, propiedades corpusculares. Regresaremos a este punto más adelante. Al corpúsculo asociado a la emisión y absorción de la radiación electromagnética se le conoce hoy como *fotón*.

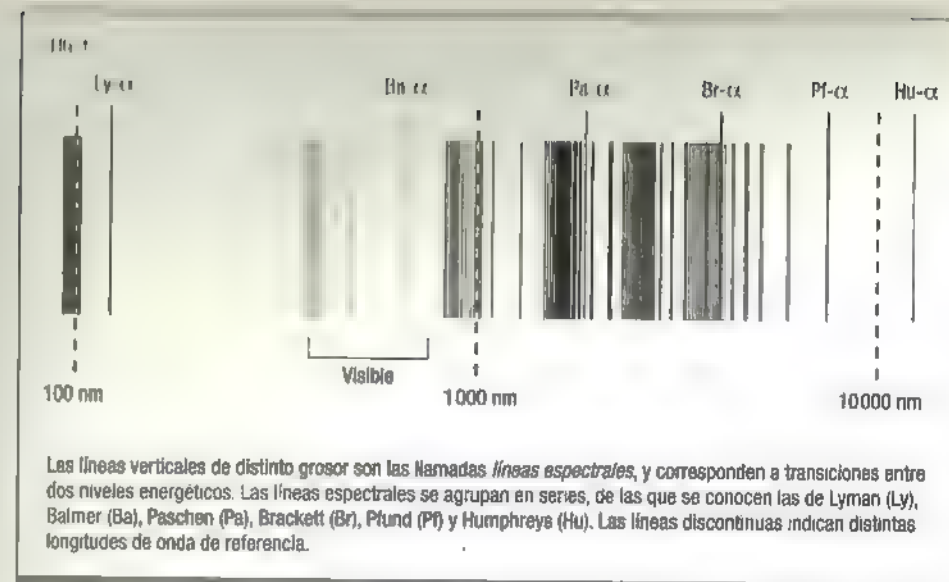
## ESTADOS Y NÚMEROS CUÁNTICOS

Alcanzado un cierto consenso sobre la cuantización de la luz, a raíz de la interpretación del efecto fotoeléctrico propuesta por Einstein, la confirmación de que el mundo microscópico estaba gobernado por las emergentes leyes cuánticas llegó de la mano del físico danés Niels Bohr. En 1913, Bohr aplicó las ideas cuánticas que con anterioridad habían desarrollado Planck y Einstein para fabricar el modelo atómico que lleva su nombre. Previamente, Ernest Rutherford, al analizar los resultados de su famoso experimento de dispersión de *partículas alfa* por una lámina de oro en 1911, había teorizado que los electrones *orbitaban* en torno a un pequeño núcleo con carga positiva. El modelo de Bohr postulaba que, al orbitar, el momento angular de un electrón podía únicamente ser un múltiplo entero de la constante de Planck dividida por  $2\pi$  (constante de Planck reducida). El momento angular de una partícula, en una trayectoria circular, es el producto de su masa, su velocidad y el radio de la órbita; y tiene también dimensiones de una acción, como la constante de Planck. Por tanto, el momento angular del electrón ligado al núcleo estaba cuantizado y, en consecuencia, el número de orbitas permitidas se reducía a un número discreto de ellas. Bohr las denominó órbitas *estacionarias* y podían ser etiquetadas con un número entero,  $n$ , que pasó a llamarse *número cuántico principal*. Además, los electrones solo cambiaban de órbita cuando absorbían o emitían el pa-

paquete elemental de luz adecuado, un fotón de una energía igual a la diferencia entre dos órbitas. Un fotón de una energía dada implicaba también una frecuencia particular. De ese modo, se justificaba que los espectros atómicos de emisión de radiación presentaran un número discreto de finas bandas, denominadas *líneas espectrales*, para ciertos valores de la frecuencia que, como en el caso del hidrógeno, eran muy bien conocidos experimentalmente (figura 1).

El modelo atómico de Bohr explicaba a la perfección el espectro de emisión o de absorción del hidrógeno y, además, resolvía uno de los problemas que Rutherford había, simplemente, ignorado al concebir su modelo: un electrón no puede, en principio, orbitar de manera estable en un átomo. La electrodinámica clásica nos enseña que una partícula cargada, como un electrón, debe emitir radiación al ser acelerada a lo largo de la trayectoria en su órbita y, por tanto, perderá energía de manera paulatina. Ese es, precisamente, el principio que se usa para fabricar una antena emisora o receptora de ondas electromagnéticas, como las de televisión o radio: el movimiento acelerado de cargas en una antena genera ondas o estas, al ser recibidas, inducen el movimiento de cargas que nos permite codificar información. Desde una perspectiva clásica, el átomo que Rutherford había concebido no podía existir más allá de un corto intervalo de tiempo, el necesario para que el electrón perdiera la energía que lo mantenía orbitando y colapsara, atraído por el núcleo. En el mundo microscópico, sin embargo, donde imperan las leyes cuánticas, el electrón solo puede radiar para *caer* de una órbita permitida a otra, también permitida y de menor energía, emitiendo un fotón. Todas las órbitas son inestables menos la *más baja* o de menor energía, que es estable y corresponde a lo que se conoce como *estado fundamental* del sistema, en este caso el átomo. Las órbitas inestables se denominan *estados excitados*.

Si los trabajos de Planck y Einstein habían demostrado que el intercambio de energía entre radiación y materia estaba cuantizado, Bohr demostró que el momento angular o la energía del electrón en el átomo estaban también cuantizados. Las leyes cuánticas reinaban en el mundo microscópico, estableciendo que



los estados de la materia eran también cuánticos. Sin embargo, la estructura de la materia y su interacción con la radiación se reveló mucho más complicada de lo que Bohr había postulado. Arnold Sommerfeld aplicó algunas sofisticaciones al modelo atómico de Bohr, introduciendo un segundo número cuántico y algunas correcciones que incorporaban efectos de la teoría de la relatividad especial o restringida que, en 1905, Einstein había formulado. De ese modo, predijo que cada órbita o estado estacionario etiquetado por el número cuántico  $n$  en el modelo de Bohr, en realidad correspondían a  $n$  estados, etiquetados ahora con la letra  $l$  (número cuántico secundario), que tomaba valores desde 0 hasta  $n-1$ , cada uno de ellos con energías ligeramente distintas. Esta predicción tenía una inmediata consecuencia espectroscópica. Donde el modelo de Bohr predecía un salto cuántico entre dos niveles con números cuánticos  $n$  y  $n+1$ , la generalización de Sommerfeld predecía los múltiples saltos entre los correspondientes  $n$  y  $n+1$  niveles, con ligeras diferencias de energías entre ellos. En consecuencia, las líneas espectrales explicadas por Bohr tenían que ser, en realidad, un paquete de líneas finamente



## EL EXPERIMENTO DE RUTHERFORD Y EL MODELO DE BOHR

El experimento de Rutherford en 1911 demostró que el átomo no era una esfera homogénea de carga positiva, como se creía antes. En su lugar, consistía en un núcleo central muy pequeño y denso, rodeado por electrones. Este experimento fue crucial para el desarrollo de la física nuclear y la comprensión de la estructura atómica. Rutherford descubrió que la mayoría de las partículas alfa pasaban rectas a través de la lámina de oro, pero algunas eran desviadas o incluso rebotadas. Esto indicaba la presencia de un núcleo cargado positivamente que repelía a las partículas alfa. A partir de estos resultados, Rutherford propuso un modelo atómico en el que el núcleo estaba en el centro y los electrones orbitaban a su alrededor. Sin embargo, este modelo tenía problemas, como la inestabilidad de las órbitas. Estos problemas fueron resueltos por Niels Bohr, quien introdujo la cuantización de la energía y el momento angular.

### Una solución aportada por Bohr

El físico alemán de Max Planck, propuso la cuantización del momento angular  $L$  del electrón en el átomo:

$$L = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar,$$

donde  $h$  es la constante de Planck y  $n$  es el número cuántico principal ( $h$  es la constante de Planck en unidades SI). Así obtuvo que para el átomo de hidrógeno (que tiene un protón y un electrón) solo puede existir un número discreto de órbitas estacionarias, con energías:

$$E_n = -\frac{1}{2} \frac{k^2 m_e e^4}{n^2 \hbar^2},$$

donde  $m_e$  y  $e$  son respectivamente la masa y la carga del electrón, y  $k$  es la constante de la fuerza electrostática de Coulomb. El signo negativo de la energía expresa que el electrón está ligado al núcleo, y solo cuando está libre o no ligado tendrá energía nula. Cuanto mayor es el número cuántico  $n$  para la órbita, mayor será la energía (menos negativa). La transición del electrón de una órbita de mayor a menor  $n$  provocará la emisión de un fotón cuya frecuencia dependerá de la diferencia de energía entre las órbitas según la ecuación de Planck. A la inversa, la transición de menor a mayor  $n$  ocurrirá si un fotón con la energía adecuada es absorbido.

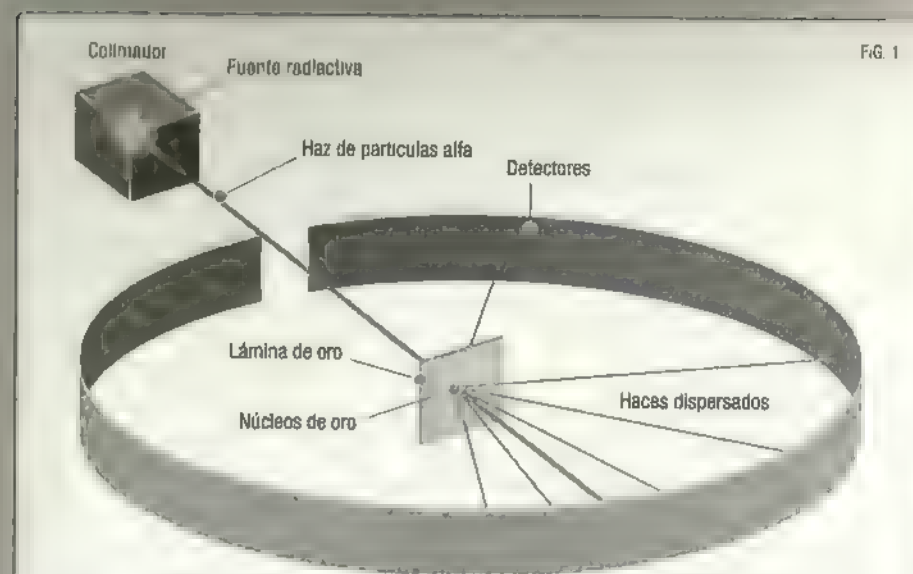


FIG. 1

El experimento realizado por Ernest Rutherford en 1911 se puede considerar como el primero de la física nuclear en la historia. Los resultados obtenidos le permitieron descubrir el núcleo atómico, y hacerse una idea de la estructura del átomo a grandes rasgos. Una fuente radiactiva, emisora de partículas alfa, genera un haz dirigido por un colimador que lo hace incidir sobre una lámina de oro y es dispersado. Los núcleos de oro provocan las desviaciones de los haces dispersados que son recogidos por los detectores.

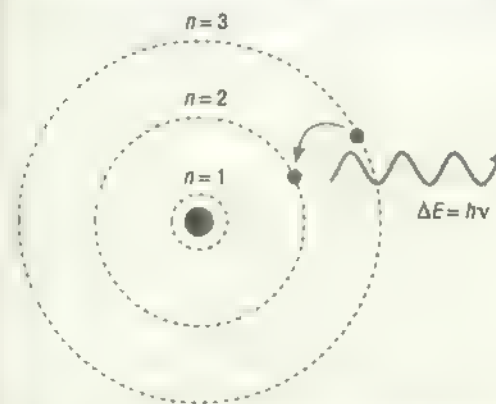


FIG. 2

El modelo atómico propuesto por Niels Bohr, aplicando las ideas de Max Planck, corrigió la interpretación errónea del modelo inicial de Ernest Rutherford. Bohr demostró que el momento angular o la energía del electrón en el átomo estaban también cuantizados.

desdobladas, como resultado de estas pequeñas diferencias de energía entre niveles (del orden de unas pocas partes en cien mil). Este fenómeno recibió el nombre de *estructura fina* espectral. La confirmación de la estructura fina predicha por Sommerfeld, que requirió de refinadas técnicas espectroscópicas, dio un nuevo espaldarazo al carácter cuántico de la materia.

La complejidad mostrada por los espectros atómicos aún exigió la introducción de un tercer número cuántico ( $m$ ), asociado a nuevos desdoblamientos en las líneas espectrales inducidos por campos magnetostáticos externos al átomo. Y aún aparecerían nuevos desdoblamientos anómalos que convertirían en un verdadero rompecabezas la interpretación de los espectros atómicos. La introducción del tercer número cuántico implicó una nueva cuantización, en este caso de un ángulo, el que formaban el vector campo magnético y un vector denominado *momento magnético orbital* asociado al movimiento del electrón en la órbita. Sin embargo, los procedimientos aplicados para la cuantización se basaban, en esencia, en la mera aplicación de restricciones a las leyes clásicas que obligaban a ciertas magnitudes a tomar únicamente valores discretos. El edificio cuántico se basaba en analogías con la mecánica clásica y carecía de la adecuada sistemática. Se echaba en falta una verdadera *mecánica cuántica* que dictara de manera consistente las nuevas leyes para el mundo microscópico y que guiara a los físicos en su comprensión.

## EL FIN DEL DETERMINISMO

Las leyes de la mecánica cuántica empezaron a perfilarse con los trabajos del físico alemán Werner Heisenberg y del austriaco Erwin Schrödinger, a lo largo de 1925 y 1926. Otros muchos destacados físicos y matemáticos, a raíz de los trabajos de Heisenberg y Schrödinger, contribuyeron a su desarrollo matemático, a la correcta interpretación de los conceptos físicos que de ella se derivaron y al escrutinio de sus inquietantes consecuencias. Podríamos destacar, por ejemplo, a Max Born, Pascual Jordan,

Wolfgang Pauli, John von Neumann o Paul A. Dirac, que dieron pasos decisivos en la construcción del nuevo formalismo para la mecánica cuántica.

Heisenberg centró sus esfuerzos iniciales en una reinterpretación cuántica, del todo sistemática, de las leyes de la cinemática y la mecánica. Su objetivo era, precisamente, construir la nueva mecánica del mundo microscópico cuyas manifestaciones eran las cuantizaciones de la radiación, como Planck y Einstein habían adelantado, y de los estados del átomo, como los modelos de Bohr y Sommerfeld, con sus números y sus saltos cuánticos, habían puesto de manifiesto. Las ideas de Heisenberg le llevaron a proponer que el análogo cuántico de cualquier magnitud física, para un sistema dado, correspondía a una matriz cuyos elementos estaban asociados a las posibles transiciones o saltos cuánticos entre todos los diferentes estados del sistema estudiado. Una matriz, en matemáticas, es una entidad bidimensional formada por números, que puede ser concebida como una caja con  $n$  filas y  $m$  columnas, donde cada uno de los números está etiquetado por los números de la fila y la columna; y para la que se definen ciertas operaciones y propiedades que le confieren cierta estructura matemática. Si se piensa, por ejemplo, en la medida de una magnitud cualquiera, que llamaremos  $A$ , para el electrón en el átomo de Bohr, Heisenberg argumentó que el resultado debía depender de un conjunto de números, que llamaremos  $A_{nm}$ , asociados a la transición entre los estados con números cuánticos  $n$  y  $m$ . Dado que  $n$  y  $m$  pueden tomar cualquier valor entero, según el modelo de Bohr, el conjunto de números es infinito aunque discreto. Técnicamente, diríamos que la matriz que asociaríamos a la magnitud  $A$  sería cuadrada (mismo número de filas que de columnas) y de orden infinito. En el caso del modelo de Sommerfeld, la descripción sería un poco más complicada porque los estados necesitarían, para su etiquetado, de hasta tres números cuánticos pero, en esencia, el concepto sería el mismo. Los saltos cuánticos entre estados definen el sistema cuántico y, por tanto, cualquier magnitud debe ser cuantificada en términos de dichos saltos. Magnitudes dinámicas como la posición o la cantidad de movimiento (el producto de la velocidad y la masa)



que, clásicamente, se representan por números pasan a ser matrices de orden infinito.

Una vez definidas cuánticamente las magnitudes físicas, el siguiente paso era reescribir de manera sistemática el análogo cuántico de las leyes de la física clásica, empleando estas magnitudes redefinidas. Desde una perspectiva moderna, lo que Heisenberg y su reinterpretación cuántica proponían era una reescritura más general de las leyes físicas, de suerte que las leyes clásicas pudieran ser recuperadas en un límite particular que hoy llamamos *límite clásico*. De eso hablaremos un poco más adelante. El hecho es que, primero Heisenberg, y después, Born y su estudiante Jordan, desarrollaron la nueva mecánica para el mundo microscópico en términos de magnitudes y expresiones matriciales. En estas expresiones, el producto de magnitudes debía aparecer como producto de matrices que, contrariamente al producto de números, no verifican la propiedad conmutativa. Es decir, dadas dos magnitudes representadas por las matrices  $Q$  y  $P$ , se tiene que el resultado del producto  $QP$  es, en general, distinto de  $PQ$ . Born y Jordan encontraron que, en particular, si  $Q$  representa la posición y  $P$ , la cantidad de movimiento de una partícula en un sistema dado, las matrices no conmutan y la diferencia entre los productos  $QP$  y  $PQ$  es proporcional a la constante de Planck reducida.

Fue, sin embargo, Heisenberg el que entendió las profundas implicaciones de este resultado. En 1927, publicó el artículo titulado «Sobre el contenido físico de la teoría cuántica de la cinemática y la mecánica», en el que enterraba el determinismo de las leyes clásicas y reformulaba nociones tan básicas como la de trayectoria de una partícula. En dicho trabajo, Heisenberg concluía que las leyes de la física clásica que parecían gobernar el mundo macroscópico eran el resultado de la pequeñez, debido al valor de la constante de Planck, de las discontinuidades y saltos cuánticos que resultaban de la mecánica cuántica. En el mundo microscópico, para pequeñas masas y pequeñas distancias, las leyes físicas operaban de manera discontinua sobre magnitudes que dependían de los saltos discontinuos entre los estados discretos accesibles a los sistemas físicos. En este mundo, magnitudes

como posición y cantidad de movimiento, están representadas por matrices que no conmutan al ser multiplicadas. Lo mismo ocurría para cualesquiera pares de magnitudes, denominadas *canónicamente conjugadas*, cuyo producto posea las mismas unidades que la constante de Planck. Heisenberg demostró que, del resultado de Born y Jordan para la diferencia entre sus productos en diferente orden, se podía deducir que las precisiones con las que estas parejas de magnitudes podían medirse estaban ligadas. El resultado era el que sigue. Si llamamos  $\Delta q$  a la precisión con la que podemos medir la magnitud  $Q$ , entendiendo por precisión que los valores de la medida se hallan en el intervalo entre  $q - \Delta q$  y  $q + \Delta q$ , siendo  $q$  el valor de la medida, y llamamos  $\Delta p$  a la precisión de  $P$ ; el producto de las precisiones no puede ser menor que la constante de Planck reducida dividida por 2:

$$\Delta q \Delta p \leq \frac{\hbar}{2}.$$

La conclusión inmediata de este resultado es que la posición y la cantidad de movimiento de una partícula, por ejemplo del electrón en el átomo, no pueden determinarse simultáneamente con precisión arbitraria. Fijar la posición del electrón con absoluta precisión, es decir, con un intervalo de incertidumbre nulo, implicará que el intervalo de incertidumbre para la medida de la cantidad de movimiento, y por tanto de la velocidad, será formalmente infinito. Medir y conocer la posición implica desconocer por completo la velocidad. La misma conclusión se derivará, del mismo modo, para cualesquiera otras parejas de variables canónicamente conjugadas, como energía y tiempo. Este famoso resultado es conocido como *principio de incertidumbre* de Heisenberg.

La mecánica clásica prescribe la evolución con el tiempo de un sistema dinámico a través de ecuaciones diferenciales de segundo orden. Ello quiere decir que las ecuaciones hacen intervenir segundas derivadas de las variables que fijan el estado del sistema. Y ello quiere también decir que obtener una solución

clada, y conocer por tanto la sucesión de estados por los que pasa el sistema a lo largo del tiempo, exige conocer los valores de esas variables y de sus primeras derivadas en un instante inicial dado. Si pensamos en una partícula, por ejemplo un electrón cuya dinámica esté gobernada por la atracción eléctrica del núcleo, la posición del electrón definiría el estado del sistema y la trayectoria del mismo, su órbita, sería la solución que describiría su evolución. En ese caso, la determinación de dicha trayectoria exige conocer la posición y su primera derivada, la velocidad, en un instante dado. Pero, en mecánica cuántica, el principio de Incertidumbre permite conocerlas solo dentro de ciertos intervalos de certidumbre que, acotados por la pequeña constante de Planck, no pueden reducirse hasta alcanzar la precisión absoluta. Las leyes cuánticas, por tanto, no permiten la determinación de la trayectoria o la órbita del electrón.

Solo aquello que puede medirse tiene realidad física. Las leyes cuánticas gobiernan un mundo de sistemas con estados discretos y saltos discontinuos entre ellos, donde las trayectorias no pueden determinarse. Hablar, por tanto, de trayectorias o de órbitas carece de significado en el mundo microscópico regido por dichas leyes. En el mundo macroscópico, la pequeñez de las discontinuidades cuánticas genera la ilusión de partículas siguiendo trayectorias bien determinadas gobernadas por leyes clásicas. Pero no deja de ser una ilusión que podremos entender mejor más adelante.

## ONDAS Y PARTÍCULAS

¿Tiene sentido preguntarse dónde está el electrón en un átomo de hidrógeno? Bohr había definido órbitas circulares estacionarias y asignado, además de un número cuántico, un radio a cada una de ellas. En concreto, el radio de la órbita para  $n=1$ , la de menor energía y consecuentemente estable, se conoce como *radio de Bohr* y se considera una medida del tamaño del átomo de hidrógeno y una escala apropiada para expresar distancias atómicas. En un mundo donde las trayectorias no tienen realidad

física, ¿cuál es el verdadero significado del radio de Bohr o del tamaño de un átomo? La respuesta a los anteriores interrogantes cristalizó a partir de un formalismo alternativo a la mecánica matricial de Heisenberg, Born y Jordan, formalmente equivalente a él pero que preparó el camino para la adecuada interpretación cuántica de la realidad física. Este formalismo se conoce como *mecánica cuántica ondulatoria* y fue desarrollado por el físico austriaco Erwin Schrödinger en 1926.

El primer paso hacia la mecánica cuántica ondulatoria, sin embargo, vino de la mano del físico teórico francés Louis de Broglie, quien, en su tesis doctoral defendida en 1924, sugirió que el electrón poseía propiedades corpusculares y ondulatorias. En palabras del propio De Broglie, el objetivo de su propuesta era «realizar una síntesis efectiva, válida para todas las partículas, de la coexistencia de aspectos corpusculares y ondulatorios que Einstein había introducido en la teoría de los cuantos de luz». Esto es lo que se conoce como *dualidad onda-partícula*. Según las ideas de De Broglie, al igual que la colisión elástica de un fotón con un electrón (denominada *efecto Compton*) describía en términos corpusculares la interacción de este último con la radiación, un haz de electrones podía ser difractado como lo era un haz de luz. La difracción es un fenómeno típicamente ondulatorio que se produce cuando una onda es distorsionada por un obstáculo o rendija que posee dimensiones similares a la longitud de la onda. De Broglie había determinado que la longitud de onda del electrón,  $\lambda$ , debía ser igual a la constante de Planck dividida por su cantidad de movimiento,

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e v},$$

siendo  $p$  la cantidad de movimiento, que se expresa como el producto de la masa del electrón por su velocidad. Así, entre 1925 y 1927, Clinton Davisson y Lester Germer generaron un haz de electrones lo suficientemente lentos como para que su longitud de onda estuviera en el rango de los rayos X, lo hicieron



## DUALIDAD ONDA-PARTÍCULA

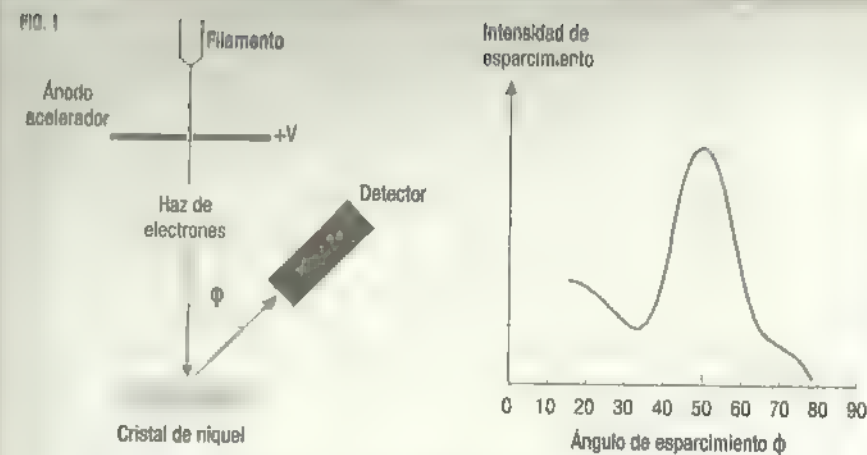
La idea de que la materia puede comportarse como onda y como partícula fue propuesta por Louis de Broglie en 1924, que planteó la hipótesis de que la materia puede comportarse como onda y como partícula. De Broglie planteó que la materia puede comportarse como onda y como partícula, y que la longitud de onda de la materia depende de su momento lineal y de su masa. Esta hipótesis fue confirmada experimentalmente por Clinton Davisson y Lester Germer en 1927, cuando demostraron que los electrones se comportaban como ondas al incidir sobre un cristal de níquel, produciendo un patrón de difracción similar al que se observa con la luz.

$$n\lambda = 2d \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\phi}{2}\right)$$

donde  $n = 0, 1, 2, \dots$ , siendo  $\phi$  el ángulo que forman el haz incidente y el difractado,  $d$  la distancia entre los planos cristalinos y  $\lambda$  la longitud de onda de De Broglie para los electrones, que puede ser calculada a partir de la energía de aceleración. Para un potencial de 54 voltios la longitud de onda de De Broglie es de 0,167 nanómetros (1 nanómetro es la millonésima parte de un metro), que es muy cercana a la longitud de onda de la luz visible. El máximo de la ley de Bragg para  $n = 1$  se observa cuando  $\phi = 50^\circ$ , como se observa en el esquema de la figura 1. Davisson y Germer midieron experimentalmente el máximo de electrones detectados que se representa en dicha figura, de acuerdo con la ley de Bragg, verificando que el haz de electrones se comportaba como una onda.

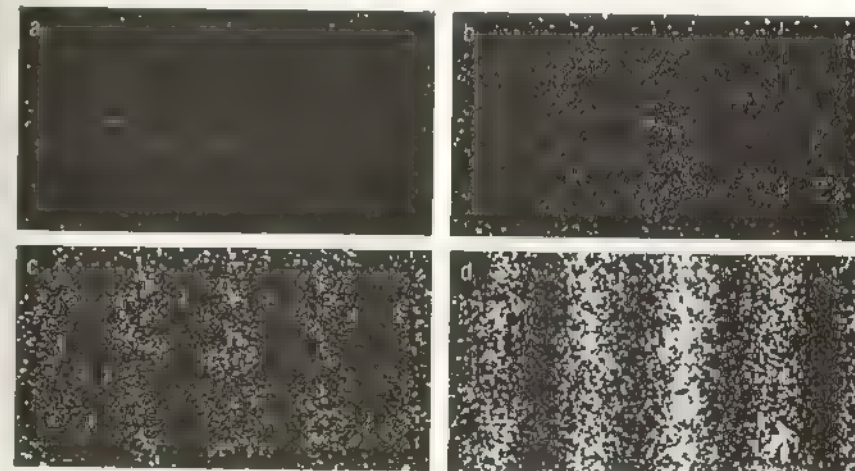
## Mostrando la conducta ondulatoria de la materia

Para demostrar la conducta ondulatoria de la materia, de un haz de electrones en particular, se pone a prueba la hipótesis de manifestarse a través del famoso experimento de la doble rendija. Thomas Young en 1801 había probado el carácter ondulatorio de la luz mostrando un clásico patrón de interferencia, con máximos de intensidad y nodos periódicamente espaciados, al hacer pasar un haz de luz por dos rendijas paralelas separadas por una distancia del mismo orden que la longitud de onda de la luz utilizada. Del mismo modo, unos experimentos realizados en 1961 con un haz de electrones atravesando una doble rendija, mostraron el patrón de interferencias que se observa en la figura 2. La distribución de los impactos de los electrones sobre una placa fotográfica de la doble rendija muestra el mismo patrón observado por Young para la luz. Sin embargo, para un número total de electrones incidentes pequeño, no se advierte aún patrón claro, pero este emerge claramente cuando el número de electrones va en aumento en los sucesivos paneles (b, c y d) de la figura. En 1974, se repitió el experimento bombardeando la placa, a través de la rejilla, con electrones disparados de uno en uno, con idénticos resultados. El patrón de interferencias en el experimento de doble rendija no es consecuencia de la interacción de múltiples electrones entre sí, es el resultado de la aplicación de la regla de Born a la probabilidad individual de cada electron (la regla de Born indica que el proceso de medición en un sistema cuántico determina un resultado concreto).



Esquema básico del experimento que Clinton Davisson y Lester Germer llevaron a cabo entre 1925 y 1927, y en el cual se confirmó la hipótesis de Louis de Broglie sobre la naturaleza ondulatoria de la materia.

FIG. 2



Unos experimentos realizados en 1961, con un haz de electrones atravesando una doble rendija, mostraron el patrón de interferencias que ya se vislumbró en 1801 con el experimento de Thomas Young, probando el carácter ondulatorio de la luz.

atravesar una red cristalina de níquel, cuyo espaciado reticular es apropiado para este rango de longitudes de onda, y usaron un detector para contar los electrones dispersados a diferentes ángulos. El resultado que obtuvieron fue que los electrones dispersados se distribuían según la ley para la difracción que William Henry Bragg y William Lawrence Bragg (padre e hijo) habían establecido en 1913. Encontraron un máximo para un ángulo que estaba en perfecto acuerdo con el que podía deducirse del espaciado reticular y de la longitud de onda predicha por De Broglie para los electrones, en función de su velocidad. De este modo, la dualidad onda-partícula resultó experimentalmente confirmada.

Dado que el electrón se comportaba como una onda, Schrödinger decidió tratarlo como tal y le asignó una *función de onda*, que los físicos designan con la letra griega  $\Psi$ , un objeto matemático que describía el estado cuántico del electrón. Dicha función, como el campo eléctrico o el campo magnético de las ondas electromagnéticas, tomaba valores para cualquier punto del espacio y del tiempo, y su dinámica debía estar gobernada por una ecuación análoga a la ecuación de onda que se deducía de las ecuaciones de Maxwell en electrodinámica clásica. Así, Schrödinger formuló la ecuación de onda, que hoy lleva su nombre, que debía regir la evolución con el tiempo de cualquier sistema dado, en este caso el electrón, y cuyas soluciones estacionarias (independientes del tiempo) proporcionarían los estados cuánticos del sistema.

La ecuación de Schrödinger, como cualquier ecuación de onda, establece una conexión entre el modo en que la función de onda cambia su valor con el transcurso del tiempo y el modo en que lo hace cuando se la evalúa en diferentes posiciones espaciales. Las tasas de variación con respecto al tiempo o la posición se expresan de forma matemática a través de *derivadas parciales*, que la ecuación de Schrödinger relaciona. Es, técnicamente, una ecuación diferencial en derivadas parciales. Si tomamos como imagen de la onda el perfil de una ola, la función de onda proporcionaría la altura de la misma en cualquier punto y en cualquier instante; y la ecuación de onda describiría cómo este perfil cambia con

el tiempo. Y lo haría relacionando el cambio de altura de la ola entre dos puntos muy cercanos, para el mismo instante, y el cambio de altura en un punto dado entre dos instantes muy próximos.

La ecuación de Schrödinger, además de estas tasas de variación, hace intervenir a la energía del sistema cuántico. Si pensamos en el electrón en el átomo de hidrógeno, la componente de la energía asociada a la velocidad, denominada *cinética*, estaría relacionada, precisamente, con la tasa de variación espacial de la función de onda; mientras que una segunda componente de la energía, denominada *potencial*, daría cuenta de la interacción entre el electrón y el núcleo, como resultado de las fuerzas eléctricas. La analogía en mecánica clásica de esta energía potencial sería la que poseería una carga eléctrica negativa, como el electrón, atraída por una carga eléctrica positiva, como el núcleo. Es decir, la energía potencial que resulta de la interacción electrostática formulada por el físico francés Charles-Augustin de Coulomb, en 1785, y que lleva su nombre. Así, Schrödinger construyó su ecuación para el problema del átomo de hidrógeno y derivó sus soluciones estacionarias. Las condiciones de cuantización y los números cuánticos que Bohr y Sommerfeld habían introducido *ad hoc* para dar cuenta de los espectros atómicos aparecían de manera natural para las soluciones estacionarias, sin más que imponer plausibilidad física al comportamiento de dichas soluciones en condiciones límite. Por ejemplo, si el electrón está ligado al núcleo, se espera que su función de onda se anule cuando la distancia entre ellos se hace infinitamente grande. Esto último, en la jerga de las ecuaciones diferenciales, se conoce como *fixar las condiciones de contorno*. El propio Schrödinger, en su primer artículo de 1926, comparó la manera natural en que emergían las condiciones de cuantización con el modo en que aparece el número entero de nodos en una cuerda vibrante. Desde el punto de vista estrictamente matemático, ambos fenómenos de discretización tienen el mismo origen. La analogía es, además, sugerente: los estados cuánticos son al espacio en el que vive la función de

No me gusta y me disgusta haber tenido que ver con ella.

ERWIN SCHRÖDINGER EN REFERENCIA  
A LA TEORÍA CUÁNTICA



onda que representa al sistema lo que los modos de vibración estacionarios a una cuerda.

En la literatura científica, la ecuación de Schrödinger para el problema del átomo suele conocerse como *modelo atómico de Schrödinger*. Sin embargo, Schrödinger simplemente la presentó y resolvió para el hidrógeno, como un caso particular sencillo de su mecánica ondulatoria. Dado cualquier otro sistema, la generalización era formalmente inmediata. El nuevo sistema estaría definido por una función de onda que dependería, *a priori*, de las posiciones espaciales de las partículas que componen el sistema y del tiempo. La evolución temporal de la nueva función de onda estaría gobernada por una nueva ecuación de onda que diferiría tan solo en la energía potencial que incorporaría las interacciones entre las partículas. Las soluciones estacionarias, finalmente, proporcionarían los estados cuánticos del sistema. Además, Schrödinger demostró que ambas formulaciones, la mecánica ondulatoria que él proponía y la mecánica matricial de Heisenberg, Born y Jordan, conducían a las mismas soluciones y, por tanto, eran formalismos diferentes pero equivalentes. No obstante, el problema técnico de resolver, en uno u otro formalismo, las ecuaciones para obtener los estados cuánticos y la evolución de un sistema dado era, más allá de algunos casos sencillos, un problema arduo que requería de ingeniosas aproximaciones. Por añadidura, en los sistemas con más de una partícula (¡todos los átomos con excepción del hidrógeno!), la cuestión asociada a cómo se pueblan los estados cuánticos monoparticulares requirió de la postulación del *principio de exclusión de Pauli*, según el cual dos electrones no podían poseer los mismos números cuánticos (compartir el mismo estado monoparticular). Principio que posteriormente pudo derivarse, de manera más general, de la exigencia de ciertas simetrías por intercambio de partículas.

La ecuación de Schrödinger tampoco tiene en cuenta efectos relativistas que sí habían sido incorporados, aunque de una manera no del todo rigurosa, por Sommerfeld. En realidad, la ecuación relativista del electrón fue desarrollada por el físico británico Paul A. Dirac en 1928 y, en ella, aparecía de manera natural un

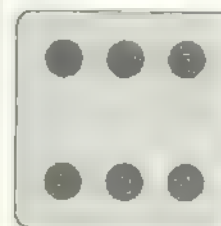
## DADOS CUÁNTICOS

El mundo cuántico de los átomos, como el mundo clásico, puede revelar algunas propiedades que son muy diferentes a las de la materia. En un experimento que se ha hecho, con un cubilete y un dado cuántico, se ve que los resultados de la medida de la velocidad de una partícula en un estado de energía bien definida tienen una componente esencialmente aleatoria. Esta aleatoriedad que resulta del proceso de medida. Las diferencias entre el mundo clásico determinista y el mundo cuántico no determinista pueden ilustrarse con la analogía que sigue. Si arrojamos un *dado clásico*, aunque el dado permanezca oculto de nuestra mirada bajo un cubilete, sabemos que alguna de las caras está boca arriba y nos mostrará su resultado. Incluso si conocemos con precisión la velocidad con la que lo arrojamos, la forma del dado, las características del suelo en el que rebotará, y así con todos los factores que influyen en la tirada, podríamos determinar el resultado antes de observarlo. La mecánica clásica nos permite hacer la *aza* y hacer trampas (figura 1).

### Diferencia clave

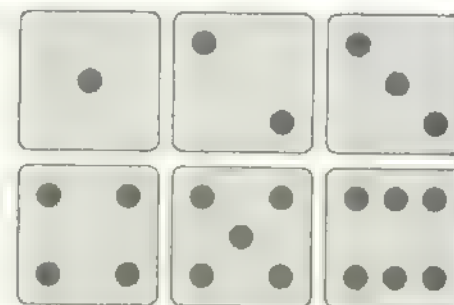
Si, por el contrario, arrojamos un *dado cuántico*, todas las caras seguirán estando boca arriba bajo el cubilete aún después de la tirada con alguna probabilidad. Todos los resultados siguen siendo posibles (figura 2). No hay nada que podamos hacer, salvo levantar el cubilete y realizar la observación para conocer el resultado. No hay ninguna cara del dado boca arriba a la espera de ser observada. La propia observación del dado determina el resultado de la tirada cuántica. La naturaleza del mundo cuántico es probabilística y el conocimiento de sus leyes no puede ayudarnos a hacer trampas.

FIG. 1



Resultado de tirada con dado normal

FIG. 2



Resultado de tirada con dado cuántico

La diferencia entre una tirada con un dado normal y otra con un dado cuántico es que con el primero siempre es solo uno el lado mostrado cara arriba; no hay ambigüedad al respecto. En cambio, en cada tirada con un dado cuántico, todos los resultados siguen siendo posibles.

número cuántico adicional, el *espín*, que había sido previamente introducido para explicar efectos observados en los espectros de átomos sometidos a campos magnéticos externos. Este espín, del que volveremos a hablar más adelante, es una propiedad fundamental de cualquier partícula, como el electrón o el protón, que suele presentarse, aunque puede resultar equívoco, a través de una simple analogía clásica: representaría el momento angular debido a la rotación interna de la partícula.

## LA REGLA DE BORN

Los estados cuánticos emergían como soluciones estacionarias de la ecuación de onda de Schrödinger, pero ¿qué representa la función de onda gobernada por dicha ecuación y cómo su interpretación puede responder a la pregunta de dónde está el electrón en el átomo de hidrógeno? La clave la proporcionó Max Born en un trabajo de 1926 sobre colisiones entre partículas regidas por las leyes cuánticas. Previamente, el propio Heisenberg había sugerido que, en el mundo microscópico, se estaba abocado a abandonar la descripción de sucesos individuales y solo se podía trabajar con los promedios estadísticos efectuados sobre conjuntos de muchos de ellos. El espectro atómico del hidrógeno, por ejemplo, no se obtenía para un único átomo, que pudiera emitir o no un único fotón, sino para un volumen macroscópico. Es decir, un volumen que contenía una cantidad de átomos del orden del número de Avogadro ( $6,022 \cdot 10^{23}$ ), donde cada uno de ellos emitiría el fotón si el electrón saltaba de una órbita a otra de menor energía, según la descripción cuántica del sistema individual. La única información contrastable experimentalmente sería la del número medio de fotones que un número ingente de átomos de hidrógeno emitiría, en unas condiciones dadas. Ese número medio se obtendría del producto de la probabilidad para el suceso individual y del número total de átomos.

Born llevó esta idea al extremo de sugerir que era necesario abandonar la perspectiva determinista clásica por la probabilística cuántica. La mecánica clásica establecía, sin dejar ningún

margen al azar, el resultado de cualquier suceso individual. Conocidas la posición y la velocidad de una partícula, su trayectoria quedaba completamente determinada y, por tanto, su

posición fijada para cualquier tiempo ulterior. *A priori*, aunque la termodinámica trataba los sistemas macroscópicos de manera estadística, introduciendo promedios sobre velocidades individuales, por ejemplo para definir la temperatura, cada partícula microscópica de un colectivo macroscópico podía ser descrita, individualmente, con la precisión deseada. Sin embargo, Heisenberg había probado que, en mecánica cuántica, era imposible definir una trayectoria. Las leyes de la mecánica cuántica no gobernaban trayectorias de partículas. De hecho, las trayectorias no tenían realidad física en el mundo cuántico. No existían. Del mismo modo, las leyes de la mecánica cuántica no describían sucesos individuales. Gobernaban, únicamente, probabilidades que se manifestaban a través de observaciones promediadas sobre conjuntos de múltiples sucesos. Las leyes físicas no determinaban sucesos individuales. Según la formulación de Born, la función de onda contiene toda la información sobre el estado del sistema cuántico y, por tanto, sobre la probabilidad de cualquier posible observación que, sobre él, podamos hacer. Todos los resultados posibles de la observación estarán contenidos, con alguna probabilidad, en el estado cuántico del sistema, y las leyes cuánticas solo gobiernan esas probabilidades, cómo se obtienen y cuál es su evolución con el tiempo. Antes de realizar una observación individual, el resultado de la misma es impredecible, estando determinado únicamente por las leyes del azar, no de la física. Los resultados derivados del trabajo de Born, que se aplican con éxito a la descripción cuantitativa de todos los fenómenos y procesos cuánticos, constituyen lo que suele denominarse la *regla de Born*. Esta regla, que describe el proceso y el resultado de una medida, es un ingrediente básico del cuerpo axiomático de la mecánica cuántica bajo la interpretación ortodoxa de Copenhague, que hemos mencionado al principio del capítulo.

Cualquiera que no esté impactado con la teoría cuántica no la ha entendido.

NIELS BOHR



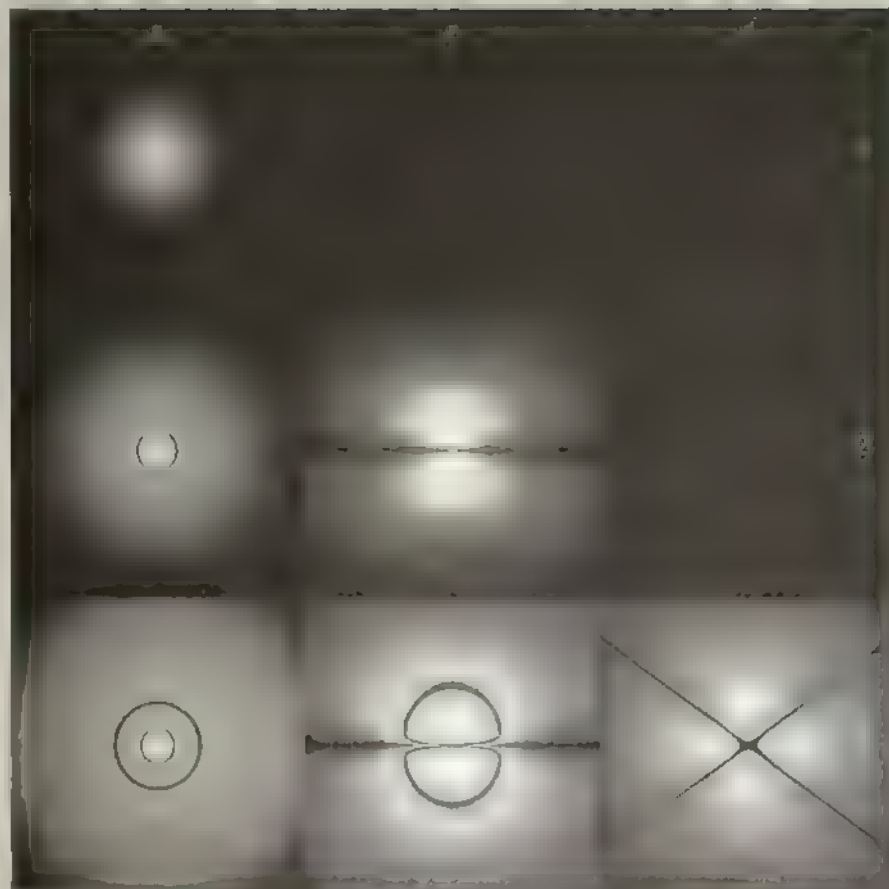


Ilustración espacial de la densidad de probabilidad de localizar el electrón en el átomo de hidrógeno, obtenida a partir del cuadrado de la función de onda, obtenida de la ecuación de Schrödinger para diferentes números cuánticos. El número en la fila corresponde al número cuántico  $n$ , mientras que las columnas corresponden de izquierda a derecha, a  $l=0$  (órbita s),  $l=1$  (órbita p) y  $l=2$  (órbita d). El valor de la densidad en un punto cuántico más oscuro es el color.

Pensemos, una vez más, en el electrón en el átomo de hidrógeno. La función de onda que define el estado del electrón nos dice qué probabilidad tenemos de localizar al electrón en cualquier re-

gión del espacio. Esa probabilidad viene dada por una operación matemática que consiste en multiplicar el cuadrado de la función de onda en cada punto del espacio por un volumen que tiende a hacerse nulo en torno al punto, para luego sumar los resultados obtenidos en todos los puntos de la región del espacio deseada. Esa operación se denomina *integración* y, técnicamente, el cuadrado de la función de onda nos proporciona la *densidad de probabilidad* de localizar al electrón en cualquier punto del espacio y para cualquier tiempo. Solo si se integra la densidad de probabilidad sobre todo el espacio, tendremos la certeza absoluta de localizar el electrón. En términos matemáticos, esto quiere decir que el resultado de esa integral extendida a todo el espacio, técnicamente denominada *norma*, es igual a la unidad. Se dice que la función de onda está *normalizada*. En la figura 2 se puede observar una representación espacial de la densidad de probabilidad para el electrón en el átomo de hidrógeno, para diferentes valores de los números cuánticos, obtenida de las soluciones de la ecuación de Schrödinger.

En consecuencia, las leyes cuánticas no nos dicen dónde hallar al electrón, todo lo que pueden decirnos es qué probabilidad tenemos de detectarlo en una región del espacio dada. El estado cuántico del electrón ligado al núcleo contiene, con ciertas probabilidades, cualquier posible localización del mismo, en cualquier punto y a cualquier distancia del núcleo. Es imposible saber dónde se halla el electrón, antes de realizar la observación. De hecho, cuánticamente, el electrón no está en ninguna parte y, con alguna probabilidad, está en todas partes.

El determinismo clásico se ha esfumado en el mundo cuántico. Nuestra percepción de la realidad es fruto de la ilusión de un determinismo que resulta de la pequeñez de los saltos cuánticos en un mundo, el macroscópico, donde energías, momentos, distancias e intervalos temporales de medida son grandes. Para ser precisos, el producto de cualquier combinación de magnitudes con las mismas dimensiones que la constante de Planck (se denominan *conjugadas*), como energía y tiempo, es muy grande comparada con la mencionada constante. La verdadera realidad física, la que escapa de la ilusión clásica en el mundo micros-

copio, es aquella cuyos elementos son las probabilidades y en la que el resultado de cualquier medida solo depende del azar. El proceso de medida no revela ninguna propiedad del sistema cuántico, fijada con anterioridad a la observación. El proceso de medida determina el resultado de la observación. Esta es, precisamente, la interpretación de la regla de Born que cuestionará Everett.

## Muchos mundos sin probabilidad

Algunos científicos fueron reacios a aceptar que el azar y la probabilidad, a través del proceso de medida, gobernarán la evolución de la realidad física. La propuesta de Everett recuperaba el determinismo para una realidad global que se desdoblaba en múltiples mundos paralelos. El título que inicialmente dio a su primer trabajo fue: «Mecánica de ondas sin probabilidad».



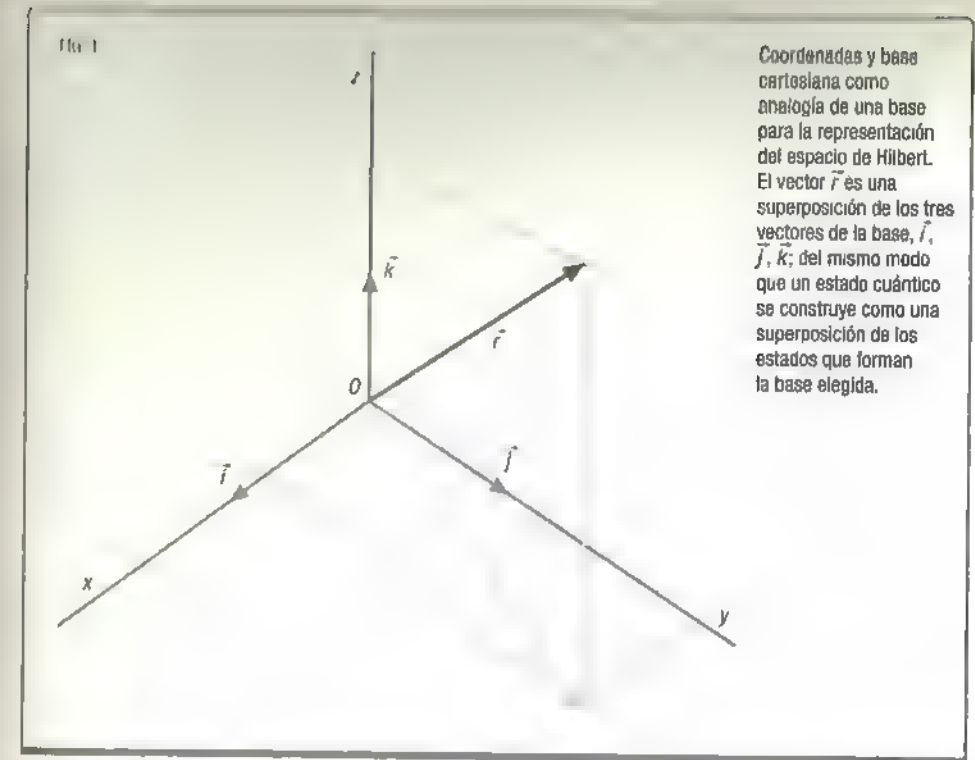
Estamos ante el punto determinante del problema que abordó Everett en su tesis doctoral y que estudiaremos, con cierto detalle, en este capítulo. Hemos seguido el recorrido de gestación de las leyes de la mecánica cuántica, esbozando sus implicaciones sobre la percepción de la realidad física del mundo que nos rodea. Esas leyes, y el mundo de probabilidades que rigen, donde el proceso de medida genera el resultado de la misma por la sola acción del azar, son el marco conceptual en el que tiene cabida la idea de un desdoblamiento casi infinito de la realidad en múltiples realidades paralelas.

La regla de Born, descrita en el capítulo anterior, es un elemento esencial para que las leyes cuánticas describan cuantitativamente, y con inusitada precisión, los experimentos que revelan la realidad física subyacente al «ilusorio» mundo macroscópico. A pesar de su éxito predictivo, su encaje dentro del formalismo de la mecánica cuántica exigió un controvertido ejercicio de interpretación que corrió a cargo de un grupo de físicos, reunidos en torno a la figura de Niels Bohr y, de uno u otro modo, ligados al Instituto Nórdico de Física Teórica de Copenhague, fundado en 1920. El resultado de este ejercicio fue la elaboración de

un cuerpo axiomático que establece, a través de una serie de postulados, la estructura matemática y la interpretación física probabilística de la mecánica cuántica. Este cuerpo recibe el nombre, ya citado con anterioridad, de *interpretación ortodoxa de Copenhague*, y constituye, a día de hoy, el paradigma universalmente aceptado para la mecánica cuántica. En concreto, los postulados III y IV se refieren a la medida de observables físicos, entendiéndose por «observable», de manera general, cualquier propiedad de un sistema físico que puede medirse a través de un experimento. El III incorpora las probabilidades dadas por la regla de Born y el IV o *postulado de la medida*, el más conflictivo, establece el denominado *colapso de la función de onda* y la consecuente pérdida de información sobre el sistema. La naturaleza no determinista de la mecánica cuántica, que se deriva del proceso de medida descrito por dichos postulados, provocó el conocido rechazo de Einstein (se le atribuye la famosa cita «Dios no juega a los dados») y focalizó el enfoque alternativo de Everett. La controversia tiene un acento muy formal y matemático, pero también un carácter profundamente filosófico, al discutir la propia estructura de la realidad que percibimos. Merece la pena, por tanto, que nos adentremos con rigor en ella.

## EL PROBLEMA DE LA MEDIDA

En el primer capítulo, se han descrito dos formalismos, la mecánica ondulatoria y la mecánica matricial, totalmente equivalentes, aunque el primero representaba el estado cuántico del sistema con una función de la posición y del tiempo, y el segundo representaba magnitudes a partir de transiciones entre los estados cuánticos del mismo. En realidad, ambos formalismos son las que hoy se conocen como representaciones diferentes de un formalismo más general y más abstracto que fue desarrollado por Von Neumann, Dirac y Jordan. En dicho formalismo, los estados son representados por vectores de una estructura matemática abstracta, denominada *espacio de Hilbert*, y las magnitudes observables por operadores que actúan transformando los



estados. Hablaremos un poco de ellos más adelante. Uno y otro mecanismo son el resultado de una diferente elección de lo que en matemáticas se conoce como una *base* del espacio de Hilbert para los estados. En el caso de Heisenberg, la base elegida corresponde al conjunto de los estados estacionarios que existen para el sistema. En la mecánica ondulatoria, se trata de la base del espacio de posiciones.

Veamos un ejemplo. En el espacio tridimensional, tres números definen la localización de un punto. Se denominan *coordenadas cartesianas*. Ello es así porque cada número nos proporciona la distancia a partir de uno dado, que se toma como referencia y que llamaremos  $O$ , a lo largo de tres direcciones perpendiculares (figura 1). Si uno asocia a cada una de las tres direcciones un vector cuyo tamaño, técnicamente *módulo*, es igual a la uni-



dad en un determinado sistema de unidades, el resultado es una base. El punto a localizar se hallará en el extremo de un vector  $r = xi + yj + zk$ , apoyado en el punto (0), donde  $x, y, z$  son las coordenadas, e  $i, j, k$  son los vectores que forman la base. El vector  $r$  es una *combinación lineal* o *superposición* de los vectores  $i, j$  y  $k$ . El espacio de Hilbert es una estructura matemática más compleja que el espacio tridimensional (que un matemático denominaría *espacio vectorial de dimensión tres*). De entrada, el espacio de Hilbert tiene dimensión infinita y ello significa que su base está compuesta por un número infinito de vectores. Sin embargo, el concepto es el mismo. La base en el caso de la mecánica ondulatoria está compuesta por un número infinito de vectores, cada uno de los cuales representa un punto del espacio. Las «coordenadas» corresponden a los valores que la función de onda toma en cada punto. El estado cuántico de una partícula caracterizado por una función de onda  $\Psi$  es, en realidad, una superposición de infinitos estados, cada uno de los cuales localiza la partícula en un punto distinto del espacio tridimensional. El peso de cada uno de esos estados en la superposición final viene dado por la función  $\Psi$  evaluada en cada punto. Y la probabilidad por su cuadrado. La suma de esas probabilidades (integración extendida a todo el espacio, en este caso, por las características de la base) es igual a la unidad.

Regresemos ahora al caso del electrón en el átomo de hidrógeno. Cualesquiera de los estados estacionarios que Bohr y Sommerfeld habían identificado, soluciones de la ecuación de Schrödinger, son superposiciones de los infinitos estados posibles en los que el electrón se halla en cualquier punto del espacio, a cualquier distancia del núcleo. Cada uno de estos estados, en los que el electrón está localizado, es un estado cuántico no estacionario. Por tanto, al no conservar la energía constante a lo largo del tiempo, no son soluciones físicas para el problema del átomo de hidrógeno aislado y estable. Una solución física para el átomo de hidrógeno, con una energía dada bien definida, exige que el electrón esté *deslocalizado* y pueda, con alguna probabilidad cuantificable, ser detectado en cualquier punto del espacio. Dicha probabilidad, como dicta la regla de Born, viene dada por

## LA FUNCIÓN DE ONDA COMPLEJA

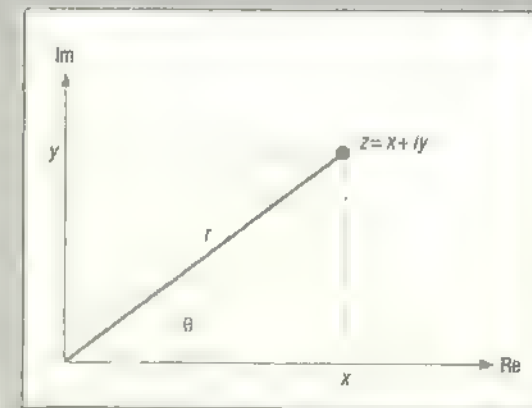
En física, la función de onda es una herramienta matemática que se utiliza para describir el estado de un sistema físico. En el caso de la mecánica cuántica, la función de onda es una función compleja que representa la probabilidad de encontrar una partícula en un determinado punto del espacio. La función de onda es una herramienta matemática que se utiliza para describir el estado de un sistema físico. En el caso de la mecánica cuántica, la función de onda es una función compleja que representa la probabilidad de encontrar una partícula en un determinado punto del espacio. La función de onda es una herramienta matemática que se utiliza para describir el estado de un sistema físico. En el caso de la mecánica cuántica, la función de onda es una función compleja que representa la probabilidad de encontrar una partícula en un determinado punto del espacio.

$$Z = x + iy$$

el cuadrado de las componentes es un número real. Los números complejos constituyen un espacio matemático abstracto y se representan como puntos en un plano.

## Mecánica cuántica y números complejos

La estructura matemática de la mecánica cuántica, para que esta pueda predecir la realidad, exige que la función de onda opere matemáticamente en el plano de los números complejos. En ese plano, el cuadrado de la función de onda se refiere al *módulo* de dicha función, que es la suma de los cuadrados de sus dos componentes: la real y la imaginaria. Es decir, en la figura, el módulo del número complejo equivale al módulo del vector que lo sitúa en el plano y es, por tanto, un número real. La función de onda que representa a un sistema físico, tiene pues una estructura complicada: con una componente real y otra imaginaria, y su evolución temporal dictada por la ecuación de Schrödinger. Tiene también lugar en el plano complejo, variando una y otra componente de manera totalmente independiente. Sin embargo, la probabilidad, dictada por la regla de Born, está expresada por el módulo de la función de onda, que es un número real. De hecho, cualquier observable físico extraído de la función de onda a través del proceso de medida, será un número real. Es la naturaleza de los que comparten la estructura matemática de la realidad. Tiene la realidad física una estructura intrínsecamente matemática o las matemáticas son una mera herramienta para aproximar la realidad? La respuesta es vital para la hipótesis de Everett, pues esta deriva de subordinar la interpretación física de la realidad a la estructura matemática de la teoría.



el cuadrado de la función de onda, solución estacionaria de la ecuación de Schrödinger. La manera en que esta probabilidad de presencia se distribuye espacialmente depende de qué solución estacionaria particular represente al estado cuántico del electrón, es decir, de sus números cuánticos. En la figura 2 del recuadro de la pág. 25, por ejemplo, pueden observarse las distribuciones espaciales de probabilidad para los estados con  $n=1$ ,  $n=2$  y  $n=3$ .

Por otra parte, cualquier estado cuántico puede, a su vez, expresarse como una superposición del conjunto infinito, pero discreto, de estados estacionarios deslocalizados. Esas superposiciones, resultado de emplear la base de estados estacionarios, conducen a las matrices cuadradas de orden infinito de Heisenberg, Born y Jordan.

En el formalismo matemático de la mecánica cuántica, los vectores representan estados cuánticos, pero ¿cómo se derivan los resultados de una medida a partir de estos vectores? La respuesta es: por medio de *operadores* asociados a cada magnitud observable. Un operador es un ente matemático que actúa sobre los vectores y los transforma de algún modo. Cada posible *observable físico* queda definido por un operador. Sin embargo, como veremos más adelante, el proceso de medida implica algo más que la acción del operador. Cuando un operador actúa sobre un vector o estado y el resultado es el mismo vector multiplicado por un número o coeficiente, se dice que el vector es un *autovector* del operador y el coeficiente un *autovalor*. Cuando el operador representa a un observable físico, el conjunto de todos sus posibles autovalores corresponde al conjunto de todos los posibles resultados de la medida de ese observable. Centrémonos en el ejemplo de la energía como observable. El operador para la energía se representa con la letra  $H$  y se le conoce con el nombre de *hamiltoniano*. Los autovectores del hamiltoniano son los estados estacionarios del sistema y sus autovalores los niveles cuánticos de energía. La acción del hamiltoniano sobre un vector  $\phi_E$  que representa un estado estacionario de energía  $E$  devolverá el mismo vector multiplicado por su energía,

$$H\phi_E = E\phi_E$$

Las soluciones de la ecuación de Schrödinger corresponden a los autovectores del hamiltoniano y, de hecho, aquella puede escribirse en términos de este y ser formalmente resuelta a fin de obtener el denominado *operador de evolución temporal*. Este operador se construye, por tanto, a partir del hamiltoniano y contiene toda la dinámica del sistema. Actuando sobre un estado cuántico de un sistema para un tiempo inicial dado, el operador de evolución lo transformará en el estado del sistema evolucionado hasta cualquier tiempo final deseado. Una propiedad esencial del operador de evolución es que, al actuar sobre cualquier estado, la transformación no modifica la norma y, por tanto, conserva la probabilidad. Técnicamente, se dice que es *unitario*.

La evolución en mecánica cuántica es, en consecuencia, unitaria. Si el sistema se encuentra inicialmente en una superposición de estados, la evolución temporal dictada por la ecuación de Schrödinger mantiene dicha superposición. Aunque los pesos y probabilidades relativas para cada estado pueden resultar alterados por el operador de evolución, la suma de las probabilidades para todos los estados, la norma, permanecerá constante. En ese sentido, aunque la información cuántica, contenida en la función de onda que define el estado del sistema, es probabilística, la evolución cuántica es determinista. Conocida la función de onda en un instante de tiempo, las leyes cuánticas la predicen en cualquier otro.

Ya sabemos, por tanto, que la función de onda contiene toda la información del sistema cuántico, cómo evoluciona esta con el transcurrir del tiempo y, también, cuáles son los posibles resultados de una medida que se extraen de ella. Pero eso no es todo. Los experimentos demuestran que, además, obtener una medida altera irreversiblemente el sistema cuántico, condicionando el resultado de cualquier medida ulterior. El matemático estadounidense, aunque de origen húngaro, John von Neumann sugirió en 1932 que la interacción del sistema cuántico con el aparato de medida externo da lugar a un segundo tipo de evolu-



## LA INTERPRETACIÓN ORTODXA DE COPENHAGUE

El desarrollo de la interpretación ortodoxa de Copenhague se puede dividir en dos etapas. La primera etapa, entre 1925 y 1927, se debe a Niels Bohr, quien estableció la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica. La segunda etapa, entre 1927 y 1935, se debe a Werner Heisenberg, quien desarrolló la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica. Bohr fue el fundador de la física de Copenhague desde 1921 y premio Nobel de Física en 1922. Heisenberg fue el principal representante de la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica y premio Nobel de Física en 1932. Ambos fueron una fuente inagotable de inspiración para sus múltiples discípulos. El desarrollo de la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica, en general, para gran parte de la comunidad de física de Copenhague se debe a Bohr y al Instituto que dirigió, surgió una escuela de pensamiento que se conoce como la interpretación ortodoxa de Copenhague de la mecánica cuántica. Entre los principales representantes de esta interpretación se encuentran Heisenberg, Max Born o John von Neumann, entre otros.

### Los principios de correspondencia y complementariedad

La interpretación ortodoxa de Copenhague consta de seis postulados. El primero establece la estructura matemática rigurosa de la mecánica cuántica, que se debe a Von Neumann, Dirac y Jordan, y a la interpretación de los resultados de los trabajos de Born y Heisenberg. En la base de esta construcción se hallan también el *principio de correspondencia* y el *principio de complementariedad*, ambos formulados por el propio Bohr. El primero fija de qué modo las leyes de la física clásica deben recuperarse a partir de las cuánticas en el límite macroscópico. El segundo establece que las naturalezas ondulatoria y corpuscular de los entes físicos complementarios se superponen, la percepción de la realidad. Esta idea aparece representada en la ilustración de la página contigua.

### Los seis postulados

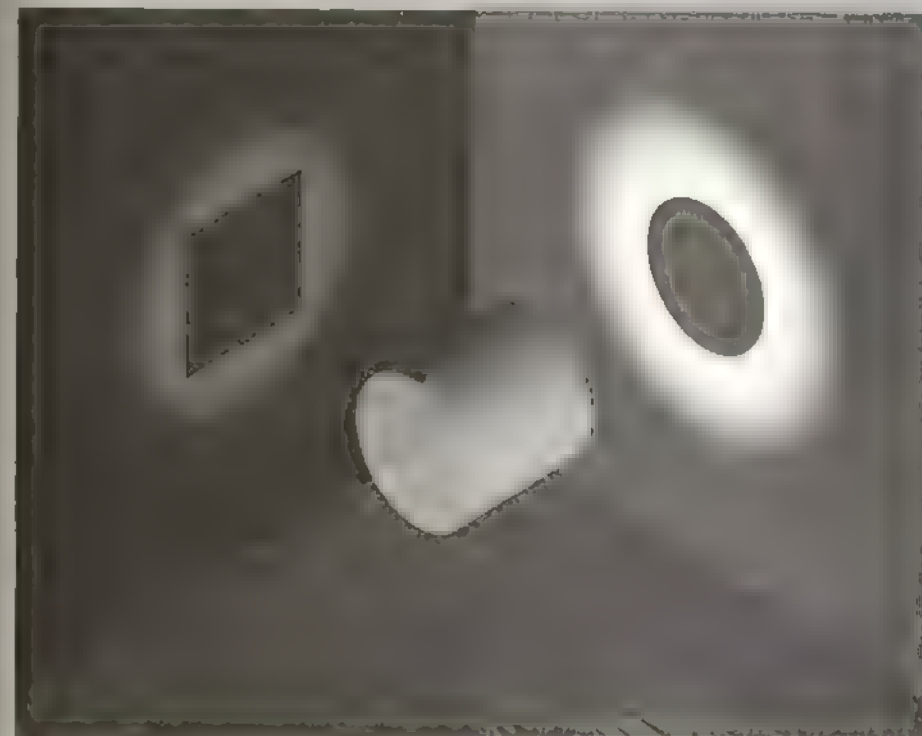
A continuación se enumeran brevemente los citados seis postulados: el I introduce los estados cuánticos como vectores del espacio de Hilbert; el II hace lo propio con los observables como operadores que actúan sobre los vectores en este espacio; el III asigna las probabilidades para la medida de cualquier observable sobre un estado cuántico y el IV postula el significado de la función de onda; el V establece la evolución determinista del estado cuántico y el VI establece la ecuación de Schrödinger,

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H\psi,$$

y finalmente el VI establece las reglas de cuantización canónicas a través de los conmutadores de variables conjugadas



A la izquierda se ve a Niels Bohr (1885-1962) galardonado con un premio Nobel y que ejerció un papel decisivo en la confirmación de que el mundo microscópico está gobernado por las leyes de la mecánica cuántica. Abajo, alegoría visual de la complementariedad de la naturaleza ondulatoria y corpuscular de la luz, donde podemos ver dos percepciones diferentes de un mismo fenómeno. Es decir, la dualidad onda-partícula explica diferentes aspectos de los experimentos, complementándose pero sin manifestarse simultáneamente.



ción, que relaciona los estados previo y posterior a la medida e implica una *reducción cuántica* no unitaria, también conocida como *colapso de la función de onda*. En esencia, el fenómeno consiste en que el proceso de medida selecciona aleatoriamente, con una probabilidad dada por la regla de Born, uno de los posibles resultados para el observable, es decir, uno de los autovalores del correspondiente operador. Además, la interacción con el aparato de medida destruye la superposición de estados, proyectando el sistema únicamente sobre el autoestado cuyo autovalor ha sido seleccionado. Imaginemos un estado cuántico que sea la superposición de dos estados estacionarios con energías  $E_1$  y  $E_2$ ,

$$\psi = a_1\phi_{E_1} + a_2\phi_{E_2},$$

donde  $a_1$  y  $a_2$  son números que nos proporcionan el peso de cada estado en la superposición. Si medimos la energía, la regla de Born nos dice que tenemos una probabilidad  $a_1^2$  de que el resultado sea  $E_1$  y  $a_2^2$  de obtener  $E_2$  (sabemos, además, que la suma de las probabilidades es 1). Que el resultado sea uno u otro está gobernado, únicamente, por el azar y la probabilidad. Sin embargo, una vez se ha realizado la medida y obtenido un resultado, por ejemplo  $E_1$ , la función de onda pasa a ser

$$\psi = \phi_{E_1},$$

colapsando en el estado que corresponde a la energía aleatoriamente medida. En consecuencia, a raíz de la primera medición, cualquier medida posterior de la energía, con certeza total, arrojará el mismo resultado  $E_1$ . La información, contenida inicialmente en la función de onda, referida a la superposición con otros estados, es destruida por el proceso de medida. Este es el controvertido postulado IV o postulado de la medida.

Podemos recurrir al símil con el espacio tridimensional para ilustrar el mecanismo del proceso de medida. Consideremos un vector representando un punto cualquiera del espacio, con sus tres coordenadas cartesianas, como el análogo de una superposición de tres estados cuánticos. Cada uno de los vectores de la base es un autovector de cierto operador y los cuadrados de las coordenadas proporcionarían las probabilidades relativas. En esa analogía, la evolución unitaria dictada por la ecuación de Schrödinger efectuaría una rotación sobre el vector, modificando sus coordenadas pero conservando el tamaño del vector, es decir, la norma. El proceso de medida, en cambio, proyectaría el vector sobre alguno de los tres ejes, suprimiendo las otras dos componentes y toda información relacionada con ellas.

¿Por qué el colapso de la función de onda es un problema para el formalismo de la mecánica cuántica? Sencillamente porque apela al aparato de medida como elemento externo que introduce la no unitariedad que se infiere de los experimentos. En realidad, el colapso de la función de onda se introduce como un postulado *ex profeso*, necesario para la predicción de resultados experimentales. Sin embargo, todo instrumento o agente necesarios para la medida deben poder incorporarse también a la descripción cuántica. Se puede definir, entonces, un nuevo sistema cuántico que engloba al sistema inicial y al aparato de medida, cuyo hamiltoniano debe dictar una evolución que incluye, también, al proceso de medida. Dicha evolución debe ser, por tanto, unitaria y contradice la necesidad de postular el colapso de la función de onda. Esta es la paradoja de la medición en mecánica cuántica que, desde los años treinta del pasado siglo, ha suscitado muchos y encendidos debates que, en no pocas ocasiones, han desbordado el campo de la propia física, para aventurarse incluso en el de la epistemología y en el de la metafísica. Destacados físicos como Niels Bohr, Albert Einstein, Erwin Schrödinger, Max Born, Werner Heisenberg, Luis de Broglie, John S. Bell, o matemáticos como John von Neumann, han figurado entre los protagonistas de esta acalorada controversia en torno a los fundamentos de la mecánica cuántica.

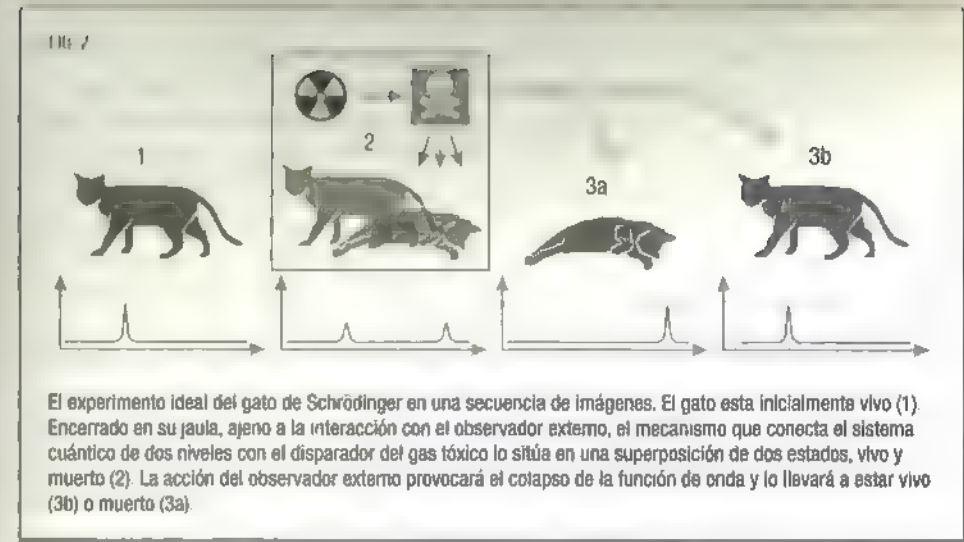


## LA INTERPRETACIÓN DE MUCHOS MUNDOS

Empecemos por recapitular. Todo, fruto de las más cuidadosas medidas experimentales realizadas a lo largo de los últimos ochenta años, apunta al carácter unitario de la evolución de los sistemas cuánticos, excepto cuando se efectúa una medida. En ese caso, el puro azar gobierna una suerte de *elección* cuántica que fuerza al sistema a ocupar un estado determinado y a perder toda traza de los restantes estados, probables antes de la medida. ¿Y qué?

Expresado en términos puramente matemáticos o formales, el problema de la medida o, como Von Neumann lo bautizó, el de la reducción no unitaria de la función de onda, puede parecer no demasiado perturbador. Sobre todo si se tiene en cuenta el carácter ya de por sí desconcertante de las leyes cuánticas cuando se las mira desde la perspectiva de la intuición o lógica cotidiana, anclada al mundo macroscópico gobernado por las leyes de la física clásica. Precisamente por ello, Schrödinger formuló la paradoja de la medida en unos términos más, digamos, provocadores. Schrödinger diseñó un ingenioso experimento ideal, del tipo de los que tanto gustaba Einstein, en el que un sistema cuántico de dos niveles resultaba estar conectado a un mecanismo que, dependiendo de qué nivel ocupaba el sistema, liberaba, o no, un gas tóxico (figura 2). El gas mataría a un gato, el famoso gato de Schrödinger, que permanecía encerrado en una jaula en la que no podía ser observado. Únicamente la intervención posterior de un observador seleccionaría uno de los estados de un sistema cuántico que determina el estado futuro del gato. La idea de Schrödinger era ligar el sistema cuántico microscópico a un fenómeno macroscópico como la supervivencia, o no, del gato. Un electrón *viviendo* en una superposición de dos estados cuánticos puede parecer solo modestamente extravagante, pero si la superposición de estados cuánticos implica que el gato está vivo, en un caso, y muerto en el otro, ¡ya es harina de otro costal!

La paradoja del gato de Schrödinger tiene el poder de apelar al sentido común, a la intuición clásica, de una manera inmediata



y provocadora. Por ello, ha sido objeto de acalorada controversia y ejemplo paradigmático de las singulares rarezas del mundo cuántico. La escapatoria más aceptada entre los físicos a esta paradoja consiste, esencialmente, en negarla. La interpretación ortodoxa de Copenhague venía a decirnos, a grandes rasgos, que la mecánica cuántica es así. Con su enfoque axiomático, la escuela de Copenhague introducía la dinámica de la función de onda que representa el estado cuántico de un sistema y postulaba el colapso de la función de onda con la medida. En términos más modernos, diríamos que cualquier sistema parte de un estado cuántico *coherente*; esta coherencia cuántica persiste cuando el sistema progresa en el tiempo bajo la acción del operador de evolución unitario, sin mediar la intervención de un observador, y sufre un proceso de *decoherencia* por acción de un aparato de medida, necesariamente macroscópico, al ser observado. Más adelante ahondaremos en los conceptos de coherencia y decoherencia cuántica.

El observador o el aparato de medida, para la escuela de Copenhague, son objetos *no cuánticos*, situados en un dominio clásico distinto al del estado coherente del sistema que pretende

ser observado. De ese modo se justifican el colapso de la función de onda que proyecta el sistema sobre un estado no coherente y clásicamente observable. El observador es, por tanto, un elemento privilegiado en la interpretación de la realidad física a partir de las leyes cuánticas. Pero ¿dónde están los límites entre el dominio macroscópico clásico y el dominio microscópico cuántico? ¿En qué consiste el proceso de decoherencia? No hay respuestas completamente satisfactorias, en el marco de la interpretación ortodoxa, para estas preguntas. Volveremos a este punto más adelante.

La perspectiva de Hugh Everett, a la hora de abordar el problema de la medida en mecánica cuántica, fue completamente distinta. Everett, bajo la supervisión de John Archibald Wheeler en la Universidad de Princeton, desarrolló un trabajo de tesis doctoral que, bajo el título de «La teoría de la función de onda universal», defendió en 1957 y en el que desafiaba la interpretación ortodoxa de la escuela de Copenhague. Si creemos al propio Everett, su enfoque radicalmente distinto empezó a ver la luz en 1954, con la ayuda de algunas copas de jerez, a raíz de una discusión con su compañero en Princeton Charles Misner y un visitante (discípulo de Niels Bohr) llamado Aage Petersen sobre las «ridículas implicaciones de la mecánica cuántica». El joven Everett decidió entonces que la estrategia acertada para interpretar correctamente la realidad física derivada de las leyes de la mecánica cuántica era dejar hablar a las ecuaciones, sin imponer *a priori* al formalismo matemático ninguna hipótesis referida a dicha interpretación.

Al hilo de esta idea, Everett se planteó que debía integrar al observador o al aparato de medida dentro del esquema de evolución unitaria determinista, dictada por la ecuación de Schrödinger. Las leyes de la mecánica cuántica, si eran correctas, tenían que regir tanto el mundo microscópico como el macroscópico. En consecuencia, no cabía apelar a ningún ente no cuántico para fijar un punto de vista privilegiado que permitiera explicar los resultados experimentales. El proceso de medida, una vez integrados observador y sistema observado, debía ser un evento de evolución unitaria, sin colapso de la función de onda e igual-

mente regido por la correspondiente ecuación de Schrödinger. La osadía de Everett residía en aceptar que, establecidas las leyes, el mundo físico emergería de imponer dichas leyes y, tan solo, cabría interpretar correctamente los resultados. Las ecuaciones determinan la realidad y no a la inversa.

En el formalismo desarrollado por Everett, objeto (sistema observado) y sujeto (observador) poseen una función de onda que los combina. La medida es un proceso de interacción entre sujeto y objeto, cuya evolución es unitaria y determinista. Sin embargo, como resultado de este proceso, los estados de sujeto y objeto solo pueden definirse el uno en relación con el otro, expresados por la misma función de onda. Pasarán a ser lo que Wheeler, el supervisor de Everett, denominó *estados relativos* y, en una jerga más moderna, llamaremos estados cuánticos *entrelazados*. Así, la función de onda del sistema combinado sujeto-objeto será, después de la medida, una superposición de pares de estados relativos entrelazados por el proceso de medida: el estado correspondiente a cada posible resultado de una medida y el estado asociado al observador que la midió. Con cada observación, se produce, por tanto, una ramificación de la función de onda del sujeto que permite construir la superposición cuántica de la que se compone la función de onda completa. En cada una de las ramas, una copia distinta del sujeto percibe cada una de las posibles medidas del objeto.

Como resultado de la propia evolución unitaria dictada por la ecuación de Schrödinger, en cada una de las ramas, la pareja de estados entrelazados evolucionará con el tiempo, a partir del suceso de medida, con absoluta independencia del resto de estados en otras ramas. Por tanto, desde la perspectiva del estado relativo del observador, lo que este mide y el resultado de la medida resultan correlacionados por el proceso de medida. El colapso de la función de onda es un fenómeno aparente para cada observador, en cada una de las ramas inducidas por la interacción sujeto-objeto que conduce a la medida. Si pensamos en la paradoja

Los científicos no atacaban públicamente la teoría de Hugh Everett, ya que es muy difícil atacar la lógica de Everett.

PETER BYRNE, BIÓGRAFO DE EVERETT



## El hombre detrás de los muchos mundos

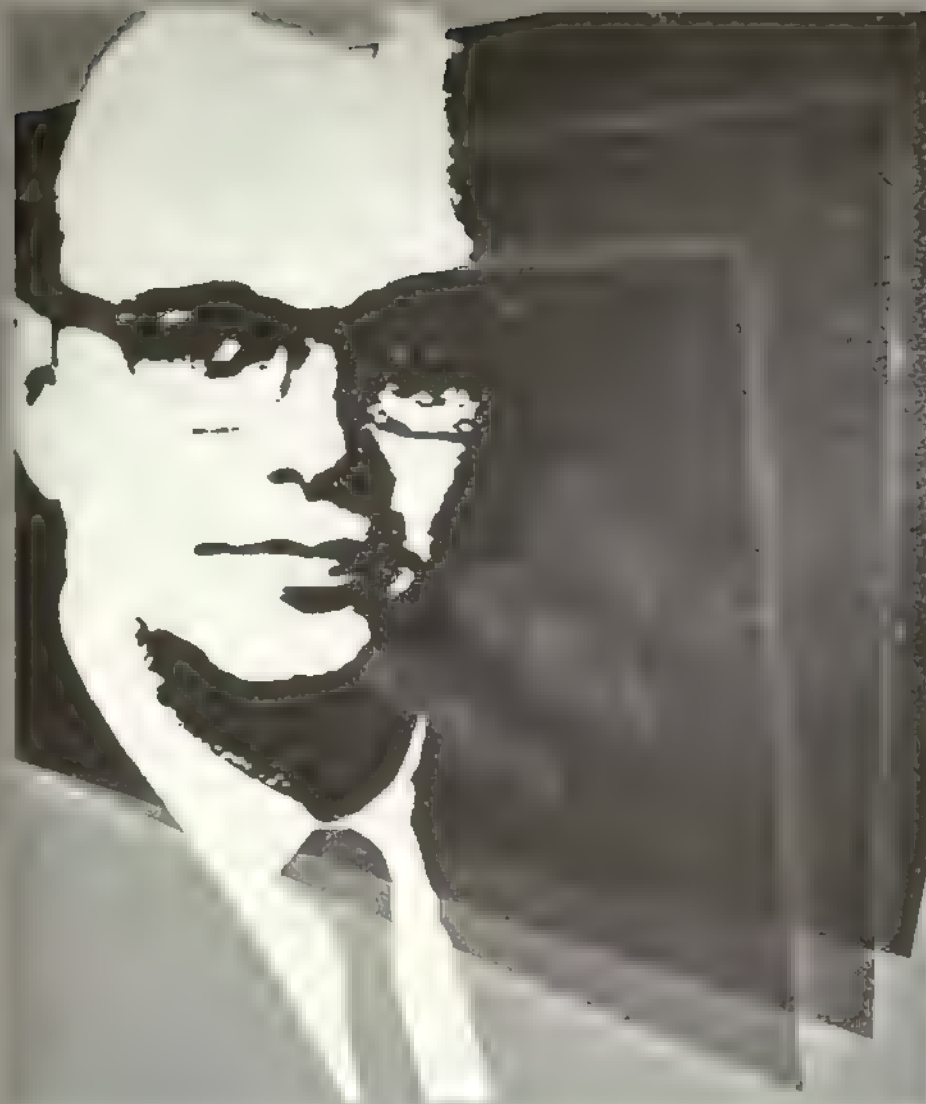
El físico teórico estadounidense Hugh Everett III, conocido como «El hombre de los muchos mundos», nació el 26 de mayo de 1927 en la ciudad de Ypsilanti, Michigan. Después de haberse graduado en la Universidad de Michigan en 1949, cursó estudios en un instituto privado militar en Annapolis, Maryland, hasta 1949, cursó estudios en un instituto privado militar en Annapolis, Maryland, hasta 1949, cursó estudios en un instituto privado militar en Annapolis, Maryland, hasta 1949.

### De la ingeniería química a la física teórica

Después de haberse graduado en la Universidad de Michigan en 1949, cursó estudios en un instituto privado militar en Annapolis, Maryland, hasta 1949, cursó estudios en un instituto privado militar en Annapolis, Maryland, hasta 1949, cursó estudios en un instituto privado militar en Annapolis, Maryland, hasta 1949.

### De la polémica al distanciamiento académico

La controversia sobre el trabajo de Everett llevó a Wheeler a viajar a Copenhague, en mayo de 1956, para presentar las ideas de su tesis ante Bohr y otros destacados componentes de la comunidad científica, con el objeto de discutirlos y ganar para ellas la mejor acogida posible. Los debates resultaron baldíos. Elio a pesar de que se mostró favorable a una cierta versión que rescataba el formalismo desarrollado por Everett de sus implicaciones más polémicas, Everett y Wheeler hubieron de alcanzar cierto compromiso para la presentación de la tesis, defendida en abril de 1957, y la publicación de un artículo en junio de ese mismo año que incluía, casi íntegramente, el contenido de aquella. El artículo se tituló «La formulación relativista de la mecánica cuántica». Antes, en junio de 1956, Everett había aceptado un puesto en el Pentágono, en la división matemática del Grupo de Evaluación de Sistemas de Armamento (WESOL, por sus siglas en inglés). Su competencia en el campo de las aplicaciones militares de la teoría de juegos, posiblemente su ascendencia militar y, con toda seguridad, su disgusto por la física y la forma final en la que sus ideas vieron la luz contribuyeron a poner fin a la carrera científica de Everett.



Hugh Everett III desafió las ideas preconizadas por Niels Bohr y su escuela de Copenhague con su teoría de la función de onda universal, que abrió la puerta a la interpretación de los muchos mundos de la mecánica cuántica.

del gato, el experimento ideal propuesto por Schrödinger para conectar el sistema cuántico de dos niveles con las dos alternativas para el felino, provoca una bifurcación en dos ramas, en una de las cuales el gato muere, mientras que permanece vivo en la otra (figura 3). Cada alternativa de una medida cuántica genera ramificaciones. En una rama, el núcleo de uranio se ha dividido e iniciado la reacción en cadena; en la otra, aún no. En una rama, el electrón cae de un nivel cuántico a otro de menor energía y se emite un fotón; en la otra, no. Las alternativas cuánticas se suceden, las ramificaciones también, generando múltiples historias paralelas contenidas en la superposición cuántica de estados entrelazados que Everett denominó *función de onda universal*. Según Everett, la función de onda universal contendría toda la información del universo, del multiverso cuántico formado por una infinidad de realidades, diferentes las unas de las otras por, al menos, el distinto resultado de una medida cuántica. El mecanismo por el cual los estados entrelazados que corresponden a cada una de esas realidades se desacoplan los unos de los otros, generando historias paralelas que no se interfieren, constituye un precursor de la moderna teoría para la decoherencia. De eso nos ocuparemos un poco más adelante.

Para Everett, la función de onda universal era un ente real y, consecuentemente, las múltiples historias paralelas también lo eran. En su tesis doctoral, en una nota a pie de página, escribió: «Desde el punto de vista de la teoría, todos los elementos de la superposición (todas las ramas) son reales; ninguno es más real que el resto». Así, la realidad parcialmente percibida por la réplica del observador que vive en una rama particular puede conducir a la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica, en la que solo el azar rige el resultado cuántico de la medida, y sobreviene el colapso de la función de onda. No obstante, en la realidad global compuesta por la totalidad de las ramas y representada por la función de onda universal, todas las alternativas son reales y la evolución unitaria y determinista no deja espacio al azar.

El término *muchos mundos*, para referirse a las ramas conteniendo historias paralelas del universo que surgen de la teoría



de Everett, fue propuesto por el físico teórico estadounidense Bryce DeWitt, quien continuó y popularizó el trabajo de Everett. La existencia de los múltiples mundos, de las realidades cuánticas paralelas, era una consecuencia de la evolución unitaria y determinista de la función de onda universal, tal como Everett la concibió. Un número de realidades creciente, que se multiplican con cada alternativa cuántica observada. Esta es la *interpretación de muchos mundos* de la mecánica cuántica.

## LOS MUCHOS MUNDOS DESPUÉS DE EVERETT

La alternativa de Everett a la, desde el punto de vista formal, insatisfactoria interpretación ortodoxa de Copenhague conduce a postular un universo compuesto por un conjunto, probablemente no numerable, e infinito, de realidades cuánticas paralelas, que divergen a partir del resultado distinto de una medida y que no pueden comunicarse entre sí. Este es el multiverso cuántico de la teoría de la función de onda universal.



La teoría de Everett desencadenó, inicialmente, reacciones adversas en el ámbito de los partidarios de la escuela de Copenhague. Algunos la tacharon de «teología». Wheeler, su propio mentor, aunque apreciaba el formalismo matemático (que ha proporcionado la base para el tratamiento moderno del entrelazamiento cuántico y la decoherencia), estimaba que la interpretación de Everett añadía «un equipaje metafísico» demasiado pesado. Tras la reacción inicial, las ideas de Everett pasaron desapercibidas durante casi una década después de la defensa de su tesis en 1957, una versión reducida de su trabajo inicial, y la publicación de un artículo, el mismo año, titulado «La formulación del estado relativo de la mecánica cuántica»; que recogía casi íntegramente el contenido de la misma.

Según Everett, las realidades cuánticas paralelas estaban, por construcción, desconectadas las unas de las otras. El proceso de decoherencia, tras el entrelazamiento de los estados relativos sujeto-objeto como resultado de la observación, aseguraba que las historias ramificadas no se interfiriesen entre sí. La interpretación de muchos mundos no permitía la refutación, ni podía ser contrastada. La primera objeción, por tanto, hacia la teoría de Everett, y el motivo de su escaso éxito inicial, resultaba de la aplicación del principio epistemológico de simplicidad, también conocido como *navaja de Occam*. El principio puede formularse como sigue: entre dos explicaciones o teorías alternativas, la más sencilla es siempre la preferible. No obstante, para Everett y los posteriores adeptos a su teoría, la navaja de Occam también podía ser esgrimida a su favor: ¿qué explicación es más sencilla?; ¿la que introduce un observador no cuántico para justificar un postulado de la medida *ad hoc* que viola el carácter unitario y determinista de la teoría?; ¿o la teoría más elegante y formalmente consistente de Everett?

Everett, en el verano de 1956, ante el riesgo de perder su prórroga de estudiante para la incorporación a filas por un cierto retraso en la defensa de su tesis, había aceptado una oferta de trabajo como investigador en el Pentágono. Aunque la defensa acabó por tener lugar en abril de 1957, Everett abandonó de modo definitivo la carrera académica, probablemente decepcio-

nado por el escaso eco inicial de su teoría. Su último trabajo en el campo de la física teórica estaba encaminado a derivar, dentro de su formulación de estados relativos, la regla de Born. Dentro del paradigma ortodoxo de la mecánica cuántica, construido por la escuela de Copenhague, la asignación de probabilidades para cada resultado posible de una medida era, simplemente, el objeto del postulado III, como también el colapso de la función de onda se introducía a través del postulado IV. Everett, sin embargo, se guiaba por la estrategia explicativa contraria: las interpretaciones resultan del formalismo, no se postulan *a priori*. Así, presentó una derivación de la regla de Born donde esta emergía como la única regla posible, afirmando que estaba tan justificada como el procedimiento de asignación de probabilidades en mecánica clásica.

La derivación de la regla de Born por Everett se considera incompleta. Otros autores han intentado completarla a lo largo de los años, como Andrew Gleason en 1957, James Hartle en 1965 o, sobre todo, Bryce DeWitt, quien, en los años setenta, rescató del olvido y popularizó la teoría de Everett de la función de onda del universo. Recientemente, autores como David Deutsch (en 1999) han presentado nuevas derivaciones de la regla de Born en la formulación de estados relativos, empleando argumentos de simetría o basados en la teoría de juegos para describir la relación sujeto-objeto. No obstante, en todos los casos, algún paso de la demostración ha sido discutido por otros autores y está sujeto a controversia. Una prueba irrefutable de la derivación de la regla de Born a partir de la formulación de estados relativos, reforzaría la mayor simplicidad y elegancia de la teoría de Everett con respecto a la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica. Sin embargo, la existencia de realidades cuánticas paralelas no dejaría de ser una consecuencia derivada de dicha formulación que escapa a la refutación o la confirmación experimental. ¿O no?

Para la mayoría de los físicos, aunque concordante con el formalismo matemático, la existencia o no de los múltiples mundos de Everett es un asunto puramente especulativo que escapa del dominio de la física. Algunos autores, en cambio, abogan

de forma activa por su existencia, como Max Tegmark o David Deutsch. Este último, incluso, ha llegado a sugerir algunos experimentos ideales que permitirían discriminar, a partir de los resultados, entre un universo regido por la formulación de la mecánica cuántica basada en la interpretación ortodoxa de Copenhague o en la interpretación de muchos mundos. Sin embargo, la realización práctica de estos experimentos exigiría una tecnología, que hoy día está fuera de nuestro alcance y quizá lo esté siempre, para la creación y manipulación de estados cuánticos macroscópicos, así como la computación cuántica pertinente. Otros experimentos ideales, de carácter aún más especulativo y contenido metafísico, como algunas variantes de la paradoja del gato de Schrödinger, enfocadas desde el punto de vista del propio gato, han sido propuestos. De estos últimos experimentos se derivan los conceptos de *suicidio cuántico*, que se refiere al proceso que precipita al gato a la superposición cuántica de estar vivo y estar muerto; e *inmortalidad cuántica*, que se refiere a la experiencia subjetiva del gato, que sobrevive al suicidio cuántico en la medida que sobrevivir es una de las alternativas cuánticas que se realiza en alguna realidad paralela.

Por otra parte, la incorporación del observador macroscópico a la descripción cuántica, a través de la función de onda universal, supone aceptar que las leyes cuánticas son universales. Aunque pocos físicos discuten esta universalidad, la interacción que domina el mundo macroscópico, la gravedad, esquiva todavía su integración en un marco compatible con las leyes cuánticas. No existe una teoría cuántica de la gravedad que sea del todo satisfactoria. La inexistencia de esta teoría, que sería el último ingrediente de lo que los físicos han dado en llamar la *teoría del todo*, permite especular con que la gravedad puede acoplar débilmente las realidades ramificadas que componen el multiverso cuántico de Everett. El físico británico Stephen Hawking, conocido por sus trabajos sobre agujeros negros (cuya descripción matemática precisa exige la unificación de gravedad y mecánica cuántica), ha propuesto una actualización de la teoría de la función de onda universal de Everett, en un ámbito cosmológico e incorporando la gravedad. La teoría de Hawking, sobre la que

volveremos en capítulos posteriores, posibilitaría la interconexión de los mundos paralelos.

## LOCALIDAD, ENTRELAZAMIENTO Y DECOHERENCIA

Para cerrar este capítulo, vamos a discutir una de las paradojas más famosas de la mecánica cuántica, según la formulación de la escuela de Copenhague, con permiso de Schrödinger y su gato. Se trata de la conocida como *paradoja EPR*, que toma su nombre de las iniciales de los apellidos de sus tres proponentes: Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen. La formulación del estado relativo de Everett y su interpretación de muchos mundos resuelven la paradoja pero, además, es precursora del tratamiento moderno, generalmente aceptado, de un fenómeno que ya hemos descrito y que origina la paradoja: el entrelazamiento cuántico.

Einstein, aunque protagonista activo en los albores de la revolución cuántica (recibió el premio Nobel por su trabajo de 1905 sobre el efecto fotoeléctrico, que hemos descrito aquí), se opuso beligerantemente a aceptar la mecánica cuántica como una teoría última y completa. En 1935, junto a Podolsky y Rosen, escribió un artículo cuyo título revelaba a las claras su propósito: «¿Puede considerarse completa la descripción en mecánica cuántica de la realidad física?». En el artículo se proponía la famosa paradoja, que puede describirse brevemente como sigue. Se hacen interaccionar, primero, dos partículas para fabricar un sistema cuántico entrelazado. Recordemos que ello significa que forman un único sistema cuántico, descrito por una única función de onda que correlaciona los estados de las dos partículas. Dos observadores separados espacialmente reciben, cada uno, una de las partículas. Por último, cuando un observador mide una magnitud correlacionada por el entrelazamiento, el resultado de su medida determina instantáneamente el resultado de la medida análoga para el otro observador, dondequiera que esté.

Imaginemos, por ejemplo, dos electrones que forman un estado con espín total nulo. El espín, recordemos, es una propiedad



conducta de las partículas que, a veces, es útil visualizarla a través de una simple analogía clásica: el momento angular debido a la rotación interna de la partícula. Siguiendo esta analogía, que los electrones formen un estado entrelazado de espín nulo equivale a que roten respecto al mismo eje con sentidos de giro opuestos. Cuánticamente, la función de onda del sistema entrelazado será una superposición de dos estados. Un estado con un electrón girando en el sentido de las agujas del reloj y el otro en el sentido opuesto; el segundo estado con los sentidos de giro invertidos. En este ejemplo y con la analogía clásica para el espín, los dos sentidos de giro son posibles, antes de la medida, para los dos observadores. Sin embargo, cuando uno de los observadores mide y obtiene, por ejemplo, que su electrón gira en sentido horario, habrá determinado de modo instantáneo que el electrón del segundo observador gira en sentido antihorario. Dado que los dos observadores pueden hallarse arbitrariamente separados, el entrelazamiento cuántico viola el *principio de localidad*. Este principio establece que causa y efecto son solo instantáneos *localmente*, es decir, en el mismo punto del espacio. Si separamos causa y efecto en el espacio y en el tiempo, el principio de localidad pasa a ser un *principio de causalidad* que, como veremos más adelante, solo tiene verdadero sentido en el marco de la relatividad especial. En nuestro ejemplo, la causa (la medida realizada por un observador) tiene un efecto instantáneo (la determinación del sentido de giro que medirá el segundo observador) en cualquier punto distante del espacio. En términos de la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica, diríamos que el colapso de la función de onda es un fenómeno *no local*, que se da instantáneamente en cualquier punto del espacio en el que la función de onda tome algún valor.

Los autores del artículo sobre la paradoja EPR elegían preservar el principio de localidad, concluyendo para ello que el proceso de medida, correctamente descrito, no podía ser fruto del azar sino determinista, revelando alguna propiedad del sistema que podía ser predicha con anterioridad a la medida. La mecánica cuántica, en su interpretación ortodoxa, tenía que ser una teoría incompleta. Formulada de una manera distinta, debían existir al-

gunos parámetros o *variables ocultas* que, incorporados a la teoría, llevarían a restaurar el determinismo. El físico británico John S. Bell, en 1964, analizó en términos cuantitativos la paradoja EPR y estableció su famoso teorema según el cual una teoría cuántica determinista, con variables ocultas locales, debe verificar las desigualdades que llevan su nombre. Las desigualdades de Bell se aplican a las correlaciones entre medidas de eventos entrelazados, en experimentos del tipo EPR. Por tanto, si las desigualdades de Bell se cumplen, la teoría cuántica es incompleta; en cambio, si la teoría cuántica es completa, dichas desigualdades serán violadas. En los últimos cuarenta años, se han efectuado repetidos experimentos que han medido estas correlaciones y detectado, en todos los casos, violaciones significativas de las desigualdades de Bell. En consecuencia, existe un amplio consenso entre los físicos para excluir el determinismo en el proceso cuántico de medida, aun a costa del principio de localidad.

La interpretación de múltiples mundos de Everett es compatible con las violaciones observadas para las desigualdades de Bell, dado que no se trata de una teoría cuántica determinista que incorpore variables ocultas locales. Por otra parte, tampoco discute el principio de localidad. Como se ha explicado previamente, la medida de cada uno de los estados entrelazados del sistema, entrelaza a su vez al observador con el estado, generando una superposición cuántica en la función de onda del universo que divide la realidad en dos. El fenómeno de la decoherencia cuántica eliminará las interferencias entre los elementos de la superposición que corresponden a diferentes resultados de la medida, desconectando las dos realidades. Así, desde el punto de vista del observador, el sistema parece haber adoptado un estado clásico, como el postulado del colapso de la función de onda prescribe. Nada impide, sin embargo, que el proceso de decoherencia, al

Como analogía, uno puede imaginar una ameba inteligente con buena memoria. La ameba se divide constantemente con el transcurso del tiempo y, cada vez, las amebas que resultan guardan la memoria de su madre. Nuestra ameba, por tanto, no tiene una historia vital lineal sino ramificada.

HUGH EVERETT

THE HFN NAYA CUANTICO

The authors are grateful to the referees for their valuable comments and suggestions. The authors also thank the editor for his/her valuable comments and suggestions.

The first part of the paper is devoted to the study of the asymptotic behavior of the sequence of functions  $f_n(x)$  defined by the recurrence relation  $f_{n+1}(x) = f_n(x) + \frac{1}{n} f_n'(x)$  with the initial condition  $f_1(x) = x$ . It is shown that the sequence converges to the function  $f(x) = x e^x$  as  $n \rightarrow \infty$ . The second part of the paper is devoted to the study of the asymptotic behavior of the sequence of functions  $g_n(x)$  defined by the recurrence relation  $g_{n+1}(x) = g_n(x) + \frac{1}{n} g_n'(x)$  with the initial condition  $g_1(x) = x^2$ . It is shown that the sequence converges to the function  $g(x) = x^2 e^x$  as  $n \rightarrow \infty$ .

El juego se juega en un tablero cuadrado de 64 casillas de 8x8. Hay 16 fichas de cada color, 8 blancas y 8 negras. El juego comienza con las fichas blancas en las casillas de color negro y las fichas negras en las casillas de color blanco. El objetivo del juego es capturar todas las fichas del oponente. Las fichas se capturan moviéndolas a la casilla inmediatamente adyacente y saltando sobre ellas. El juego termina cuando un jugador no puede hacer un movimiento legal. El jugador que captura todas las fichas del oponente gana el juego.

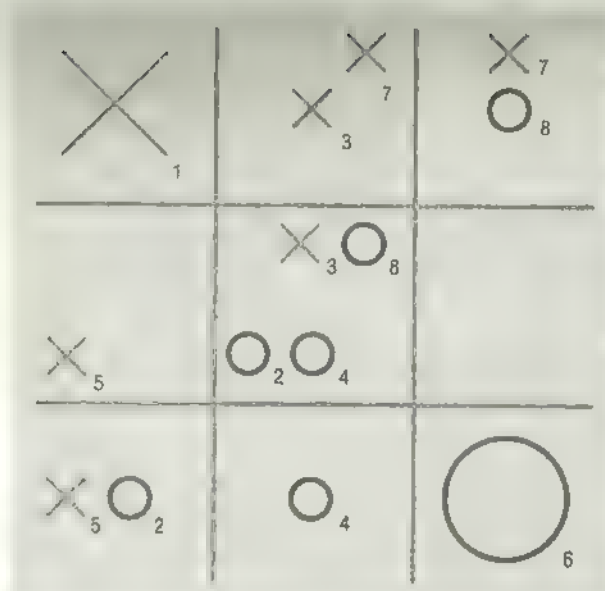
## Jugadas entrelazadas y colapso

En el caso de la figura 1 se puede observar el desarrollo de una partida tras ocho movimientos. Si se realiza el movimiento 1, se genera una cadena a derecha y de arriba abajo. Los movimientos han sido:  $X_1$  en las casillas 1 y 2,  $O_1$  en 5 y 7,  $X_2$  en 2 y 5,  $O_2$  en 5 y 8,  $X_3$  en 4 y 7,  $O_3$  en 4 y 9. Este último movimiento genera un entrelazamiento cíclico de las casillas 1 y 9 generando el co-apsos de  $X_4$  en 1 y  $O_4$  en 9. En el movimiento 2 y 3 y finalmente  $O_5$  en 3 y 5. El último movimiento ha generado un nuevo entrelazamiento cíclico ( $X_5$  en 2 y 5,  $X_6$  en 2 y 3, y  $O_6$  en 3 y 5). Si «medimos»  $X_5$  en 3 co-apsamos de forma simultánea  $O_6$  en 5 y  $X_6$  en 2 debido al entrelazamiento de las casillas 2, 3 y 5. Además,  $X_6$  está entrelazada con 7 y 8, y 7 lo está, a su vez, con 4. Todas estas casillas como estados entrelazados co-apsaran como resultado de la medición de  $X_5$  en 3. De mismo modo «medir»  $O_6$  en 5 generará otra cadena simultánea de sim-apsos co-apsos debido a su entrelazamiento.

## ¿Jugadores desdoblados?

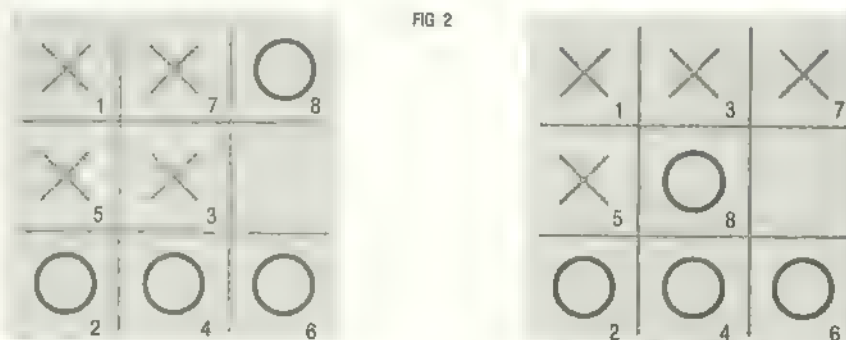
El entrelazamiento y juego ortodoxamente el entrelazamiento crea una función de onda que será la composición de los dos tableros de la figura 2, y el resultado de medir  $X \otimes X$  en la casilla superior para el colapso de la misma que destruirá la superposición obteniéndose uno u otro resultado clásico posible. Según la hipótesis de Everett, la medición hace incorporar en la función de onda al observador. Así, la función de onda del universo sigue contando con la superposición de dos estados, ligados cada uno de ellos a un observador desdoblado. Cada tablero responde a una realidad paralela que diverge por el resultado de la medida en la casilla 3. En algunas realidades, el ganador es el jugador O, que completa su tres en raya en la sexta jugada.

410 1



Tres en raya cuántico, con dos estados clásicos y varios entrelazamientos.

FIG 2



El resultado de los dos colapsos posibles como resultado de la medida en la casilla 3.



contrario que el colapso de la función de onda, sea un fenómeno local, es decir, concordante con el principio de localidad.

En la jerga actual, decoherencia es el término referido por regla general al proceso de destrucción de la superposición cuántica, formalmente equivalente al desacoplamiento, sugerido por Everett, de los elementos de la superposición en la función de onda del universo. En 1970, Dieter Zeh introdujo el moderno concepto de decoherencia cuántica y, desde entonces, el propio Zeh, Wojciech Zurek y algunos otros han estudiado el fenómeno con mucho detalle. En esencia, estos trabajos sostienen que la decoherencia es el resultado de la interacción de un sistema cuántico con su entorno macroscópico, que suprime la interferencia de los diferentes elementos de la superposición entre sí. El fenómeno es, de algún modo, análogo al que describe el segundo principio de la termodinámica. Este puede formularse en términos de una magnitud que los físicos llaman *entropía* y que, de algún modo, evalúa el grado de desorden de los sistemas físicos. El hecho es que si un sistema termodinámico intercambia calor con su entorno, la entropía total del sistema y del entorno, solo puede aumentar. La entropía del sistema, únicamente, puede reducirse pero siempre a costa de un incremento mayor de la del entorno. En el caso de la decoherencia, la destrucción de la superposición genera el mismo efecto que el colapso de la función de onda, dado que el sistema evoluciona desde un estado cuántico coherente a un estado clásico. Dicha evolución no es unitaria, dado que la información cuántica contenida en la superposición es destruida por la interacción con el entorno. En cambio, si se considera el conjunto que forman el sistema y el entorno, es este último el que disipa la información perdida y la unitariedad queda restablecida.

Existe, finalmente, una escala de tiempo propia de los procesos de decoherencia: el intervalo de tiempo necesario para la destrucción de la superposición cuántica, que es característico de cada sistema. Desde la perspectiva de la función de onda del universo de Everett, existe pues un tiempo característico en el que las realidades escindidas por el proceso de medida aún mantienen interferencias entre sí, aún comunican. Esta propie-



La detección de una mancha fría en el fondo cósmico de microondas, señalada con el círculo en el mapa del firmamento confeccionado a partir de datos del satélite astronómico WMAP de la NASA, despertó todo tipo de especulaciones, entre ellas la de que se debiera a un entrelazamiento cuántico con un universo paralelo.

dad de los fenómenos de decoherencia deja la puerta abierta a posibles test experimentales de la existencia del multiverso cuántico. Una ingeniosa idea, propuesta por Rainer Plaga en un artículo de 1997, sugiere aislar un ion (partícula con carga eléctrica) excitado en una trampa de iones, con objeto de alargar su tiempo de decoherencia y convertirlo en una suerte de pasarela entre dos mundos. Una medida cuántica sobre el ion, la de la emisión de un fotón al recuperar este su estado no excitado, conduciría a una división de la realidad en la teoría de Everett. Si, antes de que la decoherencia pueda aislar las realidades emergentes, es posible medir algún efecto de la interferencia entre el ion aún excitado y el no excitado, que distinguen las dos realidades, se habría obtenido una confirmación experimental de la interpretación de muchos mundos de Everett.

En realidad, algunos cosmólogos defienden que existe una evidencia experimental de un fenómeno similar a escala cosmológica. Se trata de la denominada *mancha fría* (figura 4), detectada

en el fondo cósmico de microondas (sobre el que profundizaremos en el capítulo 4) y que se corresponde con una extensa región del cielo en la que la temperatura asociada a la radiación de microondas es más fría de lo que la cosmología estándar puede explicar. Algunos, como Laura Mersini Houghton, sostienen que la mancha fría es la huella, impresa en el fondo cósmico de microondas hace más de 10 000 millones de años, de dos universos entrelazados cuánticamente en los que la decoherencia desgajó dos realidades paralelas, hoy desconectadas.

## Mundos probables

Las leyes universales para la dinámica y la gravitación de Newton posibilitaron una visión del cosmos que haría probable la existencia de múltiples mundos dentro de nuestro universo. La revolución de la física protagonizada por Einstein, que inició la era de la cosmología moderna, cambiaría radicalmente nuestra visión del universo, pero la mantendría compatible con la existencia de múltiples realidades paralelas.



En el capítulo anterior hemos diseccionado la interpretación de muchos mundos de la mecánica cuántica y argumentado que la estructura matemática del formalismo cuántico y su consistencia son la principal base científica para sugerir la existencia de múltiples realidades paralelas, las cuales se multiplican continuamente como resultado del proceso cuántico de medida y de la realización de todos sus posibles resultados alternativos. La especulación sobre la existencia de múltiples mundos paralelos, sin embargo, no nació con las extravagancias de la mecánica cuántica en la descripción e interpretación de la realidad física. De hecho, la idea de la existencia de mundos o realidades paralelas es casi tan antigua como la de las primeras cosmovisiones elaboradas por la inquieta y curiosa mente del ser humano.

De manera general, las primeras descripciones del mundo visible se entretajían con el relato de una realidad invisible, motivada por la visión religiosa dominante, constituyendo una cosmogonía integrada en la que tenían cabida diferentes planos o esferas de la realidad y mundos simultáneos, conectados de algún modo. Tal era el caso, por ejemplo, de las cosmogonías ame-

andinas azteca, incaica o maya, que concebían además el tiempo de manera cíclica, como una sucesión infinita de periodos de desorden o *caos* y orden o *cosmos* (una intuitiva y sorprendente anticipación de la teoría del universo oscilante). Del mismo modo, la cosmología moderna, en concordancia con observaciones realizadas mediante los más potentes instrumentos y fundamentada en los formalismos y las ecuaciones con los que la física, moderna también, da buena cuenta de los fenómenos que podemos medir, parece también apuntar hacia la probable existencia de múltiples mundos paralelos. En particular, podría estar fundado especular que uno de ellos, o incluso muchos, puedan ser idénticos al nuestro en el instante presente, hasta en su más mínimo detalle, aunque algún suceso en un instante posterior puedan llevarlos a distinguirse.

Bajo ciertas condiciones, incluso un universo clásico, que no se rigiera por las leyes de la mecánica cuántica, podría albergar otros mundos con una historia semejante a la del nuestro. Desde una perspectiva cosmológica, su existencia puede ser, como veremos más adelante, una mera consecuencia de la probabilidad. Para ilustrar esta cuestión de una manera sencilla y clásica, consideremos la pregunta que sigue: ¿Qué probabilidad tendría un chimpancé, aporreando aleatoriamente el teclado de un ordenador, de reproducir la novela *El Quijote* de Miguel de Cervantes? La probabilidad puede parecernos harto pequeña y la ocurrencia de dicho suceso muy remota, casi imposible. ¿Y de reproducir las tres primeras palabras de la obra de Cervantes?

Supongamos que nuestro chimpancé ha sido entrenado para presionar una tecla cada vez, y simplifiquemos su tarea (y nuestra estimación) no distinguiendo entre mayúsculas y minúsculas y usando un teclado especial con, únicamente, 31 teclas: 27 letras, el punto, la coma, el punto y coma y el espacio en blanco. El número de variaciones que podrían obtenerse tecleando 11 veces al azar, como haría nuestro chimpancé (a menos que le enseñemos a leer y escribir), sería de 31 elevado a la potencia 11. De todas esas variaciones, tan solo una corresponde a «en un lugar», como el comienzo de *El Quijote*. Es decir, la probabilidad de obtener esa combinación sería de, aproximadamente, una entre 25 000 bi-

llones. Un suceso muy improbable. Y si disponemos de un millar de monos entrenados del mismo modo, ¿cuál sería la probabilidad de que alguno tecleara esas tres primeras palabras? La respuesta es que, aproximadamente, en cuatro de cada cien billones de intentos de nuestro millar de monos, alguno lo conseguiría. Un suceso no mucho más probable. ¿Y si disponemos de 25 000 billones de chimpancés? En ese caso, aproximadamente 63 de cada 100 intentos de nuestro grupo de simios se verían coronados por el éxito. Ahora no está tan mal, ¿no?

Regresando al caso del texto completo de *El Quijote*, el número de variaciones posibles (tecleando tantas veces como caracteres tiene dicho texto) resultaría verdaderamente abrumador, pero alcanzaríamos la misma conclusión: si uno dispone de tantos chimpancés como variaciones posibles, la probabilidad de que alguno de ellos reproduzca el texto completo sería de poco más del 63%. Si se dispone del doble de chimpancés que de variaciones, la probabilidad sería aproximadamente del 86%. La ocurrencia del suceso es, por tanto, una mera cuestión de número. Las condiciones bajo las cuales nuestro universo albergaría mundos con historias idénticas son también una cuestión de número. Estudiémoslas.

## EL UNIVERSO SEGÚN NEWTON

Si bien toda civilización humana ha desarrollado algún tipo de cosmogonía, la cosmología como ciencia o, lo que es equivalente, la formulación de preguntas sobre la estructura y origen del universo planteadas de manera rigurosa y susceptibles de ser respondidas razonablemente, con las ciencias empíricas como herramienta, puede tener una fecha de nacimiento relativamente reciente: 1687, el año de publicación de *Philosophiæ naturalis principia mathematica* (*Principios matemáticos de la filosofía natural*), la magna obra de Newton que, por primera vez, en el siglo xvii, establecía leyes universales para la naturaleza, a cuyo gobierno nada en el mundo natural escapaba, y que se expresaban a través de las matemáticas.



Las leyes fundamentales de la dinámica y de la gravedad explicaban la caída de una manzana e igualmente las órbitas planetarias descritas por el alemán Johannes Kepler (1571-1630). En consecuencia, debían regir el cosmos en su conjunto y servir para responder a los interrogantes que sobre él pudieran plantearse. O a formularlos. Esto último es lo que hizo, precisamente, el reverendo anglicano Richard Bentley (1662-1742), que sugirió la inconsistencia de la ley de la gravedad de Newton con respecto al universo estable y estático que parecía deducirse de la observación de los cielos.

Newton había formulado que dos objetos masivos ejercen una fuerza de atracción mutua, que crece en proporción a sus masas y disminuye en proporción al inverso del cuadrado de la distancia que separa a dichos objetos. El carácter siempre atractivo de las fuerzas y su comportamiento con la distancia y las masas, argumentaba Bentley, provocarían el colapso de un universo finito e inicialmente estático. La solución de Newton a la paradoja planteada por Bentley era un universo infinito con una distribución homogénea y uniforme de masa. En esas condiciones, todas las fuerzas gravitatorias, aun siendo atractivas, se cancelarían entre sí por una simple cuestión de simetría. En un universo de esas características, de hecho, un punto del espacio sería semejante a cualquier otro y, desde cualquiera de ellos, todas las direcciones serían indistinguibles las unas de las otras. Un observador vería la misma distribución de masa desde cualquier punto y en cualquier dirección (técnicamente, diríamos que el universo es simétrico bajo traslaciones y rotaciones). Si, desde el punto de vista de la distribución de la masa del universo, ninguna dirección es diferente a las demás, la fuerza que resulta de la acción gravitatoria de toda esa masa no puede apuntar más a una dirección que a otra, y solo puede ser nula. Y eso se aplica, además, a cualquier punto del universo.

Aun así, el universo de Newton se hallaría en un equilibrio muy delicado, muy inestable. Cualquier pequeña perturbación de esa distribución de masa rompería el equilibrio y generaría fuerzas que originarían colapsos locales y más desequilibrio. En un universo infinito, con infinita masa, la reacción en cadena sería cata-

clísmica. Pero no era ese el único inconveniente teórico para un universo infinito. Otra funosa paradoja, formulada por el alemán Heinrich Wilhelm Olbers (1758-1840), puso en jaque la concepción de un universo infinito que Newton desarrolló en respuesta a la objeción de Bentley.

La conocida como *paradoja de Olbers* es resumible en una simple

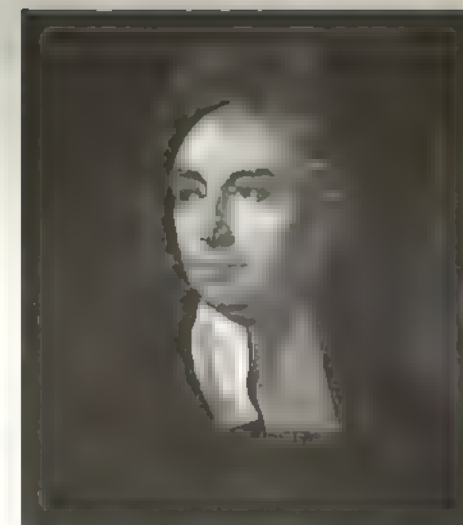
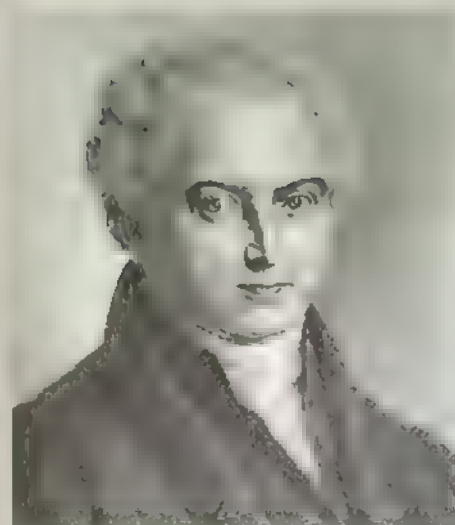
pregunta: ¿puede ser negro el cielo nocturno en un universo infinito? La pregunta puede parecer sencilla pero ha torturado a muchos astrónomos, a lo largo de varios siglos, hasta que el progreso de nuestro conocimiento en física y cosmología permitió la destilación de una respuesta plausible. Si, según lo planteado por Bentley y la explicación ofrecida por Newton, el universo tenía que ser infinito y uniforme, la Tierra recibiría una cantidad infinita de luz por segundo. En cualquier dirección a la que mirásemos, en una fracción dada de cielo, la intensidad luminosa sería abrasadoramente infinita. El cielo nocturno tendría que ser uniforme e infinitamente luminoso. De hecho, el cielo diurno también. La posición aparente de nuestro Sol no establecería diferencia alguna en la intensidad luminosa observada en el cielo. La razón es bien sencilla. La cantidad de radiación luminosa que llegaría cada segundo a la Tierra, emitida desde una estrella situada a una distancia dada, es proporcional al inverso de dicha distancia al cuadrado, como también sucedía para la intensidad de la fuerza gravitatoria. No obstante, en un universo uniforme, el número de estrellas situadas a una distancia dada crece proporcionalmente al cuadrado de dicha distancia. En consecuencia, la intensidad total de la luz recibida del conjunto de estrellas situadas todas en un intervalo dado de distancias, es decir, dentro de una corteza esférica dada, resulta ser siempre la misma. En un universo infinito, el número de cortezas esféricas que rodean la Tierra es asimismo infinito, como también lo es la suma de las intensidades de la luz recibida desde cada una de ellas.

No me interesa tanto la mente humana como la maravilla de una naturaleza que es capaz de obedecer una ley tan simple y tan elegante como la ley de la gravedad.

RICHARD P. FEYNMAN

Nuestro cielo nocturno no concuerda, por tanto, con un universo uniforme, infinito... y estacionario! Esta última propiedad del universo que Newton y sus coetáneos (y aun mucho después) admitían implícitamente, y nunca se ponía en tela de juicio, desempeña un papel decisivo. El universo tiene que haber sido siempre igual, inmutable. Las estrellas tienen que haber estado emitiendo luz desde siempre para que, cada segundo, nos esté llegando su luz desde cualquier punto del universo, por lejano que sea. A menos que la propagación de la luz sea instantánea, con velocidad infinita. Esta última condición sí fue discutida por, entre otros, Newton, quien hizo algunos intentos de medir la velocidad de propagación de la luz. Todos infructuosos. Fue el astrónomo danés Ole Christensen Rømer quien, en 1676, analizando ciertas discrepancias en la duración de los eclipses de Ío, una luna de Júpiter, las atribuyó acertadamente al efecto combinado de una velocidad finita para la luz y la posición relativa de la Tierra con respecto a Júpiter, que varía a medida que ambos planetas describen sus respectivas órbitas. De este modo, proporcionó la primera prueba empírica del carácter finito de la velocidad de la luz, aunque una estimación fiable de dicha velocidad tuvo que esperar hasta 1808 y al astrónomo francés Jean-Baptiste Delambre.

La velocidad de la luz en el vacío es, de hecho, una constante universal y, como discutiremos más adelante, independiente de cualquier sistema de referencia. Por tanto, cuanto más distante sea una estrella, más tiempo habrá necesitado su luz para salvar la distancia que nos separa de ella. Cada fotón, cuando miramos hacia nuestro Sol, ha viajado durante aproximadamente 500 segundos por el sistema solar antes de ser captado por nuestro ojo; cuando contemplamos las estrellas del cielo nocturno, estamos detectando luz que fue emitida hace pocos años, en el caso de las más cercanas como Próxima Centauri, o cientos de miles para las más lejanas de nuestra galaxia. Dada la inmensidad abrumadora de las distancias siderales, estas no suelen expresarse con las unidades usuales sino en otras acuñadas específicamente para la astronomía como el *año-luz*, que equivale a la distancia recorrida por la luz en un año. Los más potentes telescopios actuales per-



Heinrich Olbers (arriba a la izquierda) cuestionó el concepto de un universo infinito que Isaac Newton desarrolló en respuesta a una importante objeción planteada por Richard Bentley (derecha). Así surgió lo que se conoce como paradoja de Olbers, y que es resumible en una pregunta engañosamente simple: ¿puede ser negro el cielo nocturno en un universo infinito? La imagen inferior reproduce la obra de William Blake *Alegoría de la figura de Newton* (1795), en la que el científico inglés aparece representado como el «divino geómetra».



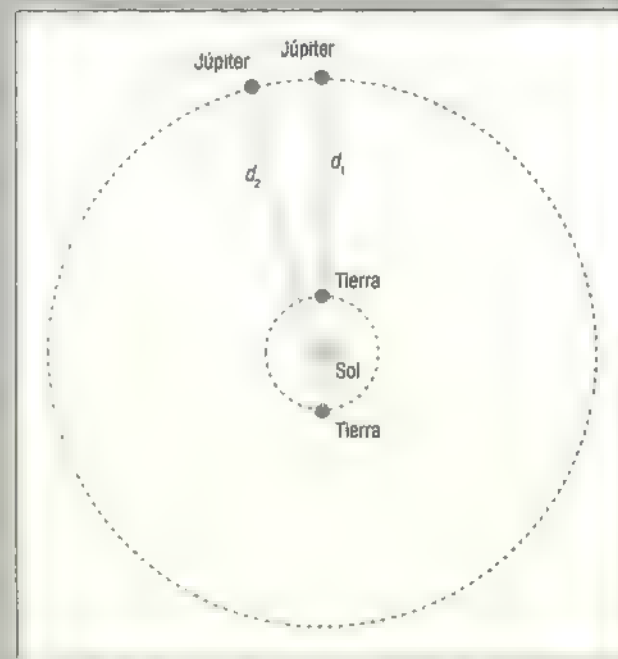
mil millones de galaxias que se hallan a miles de millones de años luz, y nos muestran cómo era el universo hace miles de millones de años.

Apuntar con nuestros modernos telescopios a regiones remotas de nuestro vasto universo es, por tanto, un ejercicio de retrospectiva que nos remonta en el tiempo millones de años, cientos de millones, miles de millones incluso. ¿Ha sido siempre el universo como lo vemos ahora? ¿Es estacionario? Hoy sabemos, empíricamente, que la respuesta es negativa. El universo no es inmutable, como tampoco lo son las estrellas. Evolucionan, tienen un principio y alguna suerte de final. Más adelante, nos ocuparemos con detalle de esta cuestión fundamental pero, antes de que la astronomía moderna pudiera proporcionarnos múltiples pistas directas, las leyes de Newton, las objeciones de Bentley y Olbers, y el trabajo de Römer configuraron una visión del universo que podemos llamar clásica. El universo tenía que ser infinito, uniformemente distribuido y haber tenido un principio. De ese modo, aun siendo infinito, el universo visible sería finito, dado que permanecerían invisibles todas aquellas estrellas cuya luz, emitida al principio del universo, aún no hubiera recorrido la distancia que nos separa de ellas. Desde la Tierra, el universo visible tendría un radio igual a la edad del universo, desde su principio, expresada en años-luz. Solo así un universo que escaparía a la paradoja de Bentley, por su simetría, escaparía también a la de Olbers.

Este universo clásico o newtoniano resulta ser muy sugerente para el tema que nos ocupa. Infinito y uniformemente distribuido, dicho universo debe contener una infinidad de regiones independientes las unas de las otras. Alguna suerte de *universos-isla*, empleando el término acuñado por el filósofo germano Immanuel Kant (1724-1804) para referirse a lo que hoy conocemos como *galaxias*. Con una edad finita, el número de historias posibles para cada uno de esos universos-isla es también finito, por abrumador que sea su número. Y al contrario, como sucedía con nuestro ejército de chimpancés al teclado y la probabilidad de que reprodujeran el texto de *El Quijote*, con una infinidad de mundos, sus historias tienen por fuerza que repetirse. Mundos

## LA VELOCIDAD DE LA LUZ

El primer método para medir la velocidad de la luz se basó en la observación de la velocidad de la luz a lo largo de un año, basándose en la observación de los eclipses de los satélites de Júpiter. Los eclipses de los satélites de Júpiter se observaron por primera vez en 1610, cuando Galileo descubrió que los eclipses de los satélites de Júpiter se observaban con un retraso progresivo a medida que se alejaban de la Tierra. El retraso máximo a partir del cual comenzaba a reducirse hasta desaparecer el eclipse se unido anual. Las leyes de Kepler permitían determinar con gran precisión el inicio de cada eclipse y Römer, acertadamente, atribuyó las anomalías a la velocidad de la luz. Veamos por qué. En el dibujo esquemático de la figura se indican las posiciones y distancias relativas,  $d_1$  y  $d_2$ , de la Tierra y Júpiter en dos situaciones orbitales diferentes. Las posiciones de Júpiter son tales que, en ambas, su satélite lo inicia su fase de ocultación entra en la zona de sombra de Júpiter según la perspectiva visual desde la Tierra. Las previsiones de Römer se debían a cálculos, basados en las leyes de Kepler que establecían el tiempo necesario para que Júpiter progresara desde la posición 1 a la 2. Sin embargo, si la velocidad de la luz es finita, y la llamamos  $c$ , un observador en la Tierra como Römer recibiría el último rayo de luz de Júpiter antes de su ocultación después de un tiempo  $d_1/c$  en la posición 1 y después de un tiempo  $d_2/c$  en la posición 2. De ese modo se produciría un desfase entre las previsiones de Römer y su observación del inicio de los eclipses en 1 y 2 igual a  $(d_2 - d_1)/c$ . El retraso alcanzaría un valor máximo cuando la diferencia de distancias  $d_2 - d_1$  se hiciera también máxima. Midiendo el retraso máximo y conocidas las distancias, podía estimarse la velocidad de la luz. Esta es la técnica conocida como *método de Römer*, que aplicó el francés Jean Baptiste Delambre (1749-1822) para estimar en 1818, que la velocidad de la luz era igual a 302 000 km/s. Las mejoras actuales en la capacidad de medición han conducido a un valor de 299 792 458 km/s.



que, aunque remotamente lejanos, han seguido historias paralelas, por la simple ley de la probabilidad.

## EL UNIVERSO SEGÚN EINSTEIN

El concepto del universo que acabamos de describir permaneció, en lo esencial, vigente hasta el siglo xix. Aunque los astrónomos habían identificado algunos fenómenos singulares, como la *supernova* (explosión final de una estrella supermasiva en uno de sus estadios evolutivos) que pudieron asociarse a la aparición de nebulosas, como la del Cangrejo, en lo fundamental, la regularidad parecía regir un cosmos estacionario. A gran escala, las leyes de Newton apuntaban hacia un universo infinito y uniforme. A pequeña escala, el francés Pierre Simon Laplace (1749-1827) y Kant habían aplicado las mismas leyes para proponer una explicación del origen del sistema solar, a partir de una nebulosa de gas y polvo que se contrajo por efecto de la gravedad. Ya en el siglo xix, el mismo mecanismo de contracción fue propuesto por el británico William Thomson (lord Kelvin) (1824-1907) y el alemán Hermann von Helmholtz (1821-1894) como fuente de energía para el Sol. Por tanto, a pequeña escala al menos, para el sistema solar, la idea de nacimiento y evolución empezaba a ser aceptada.

Entonces, el siglo xx, que revolucionó la física, removió también los cimientos del concepto que se tenía del universo y sentó las firmes bases de la cosmología moderna. Ya hemos prestado prolija atención a la primera gran revolución de la física, en los albores del siglo xx, la mecánica cuántica. Sin la segunda, iniciada también en la primera década del siglo pasado, la teoría de la relatividad, sería imposible entender la cosmología moderna.

Si la revolución cuántica fue una obra coral, a la que contribuyeron muchas de las mentes más brillantes de la física contemporánea, la segunda fue fruto de la audacia y la inteligencia aguda y perseverante de un único hombre, a lo largo de más de una década, Albert Einstein.

## La teoría de la relatividad especial

En su, antes citado, *annus mirabilis* de 1905, además de su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico que describimos en el primer capítulo, Einstein publicó en los *Anales de Física* de la Sociedad Alemana de Física el artículo titulado «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento». Bajo este título, técnico y algo críptico, se escondía la primera formulación de la teoría de la relatividad, en su versión especial, que Einstein continuó perfilando en artículos posteriores. En su revolucionario artículo, Einstein se ocupaba fundamentalmente de la invariancia de las leyes físicas frente a cambios de sistemas de referencia. Profundicemos, aunque de forma breve, en esta importante cuestión.

En la física clásica, todo sistema físico queda determinado por el valor de ciertas magnitudes, escalares (que se determinan del todo con un valor numérico y sus unidades) o vectoriales (que se determinan con un valor numérico y sus unidades, y que además requieren especificar dirección y sentido). La evolución con el tiempo de dichas magnitudes expresa la propia evolución dinámica del sistema. Pensemos, clásicamente, en un electrón y en su trayectoria en el seno de un campo eléctrico. Aparte de sus propiedades intrínsecas, como su carga o su masa, el conocimiento de la posición del electrón define el estado del sistema. Como se explicó en el capítulo anterior, los físicos expresan la posición por medio de un vector referido a un sistema de referencia, compuesto por una base, cartesiana por ejemplo, y un punto del espacio ligado al observador. La posición siempre es relativa a un cierto observador y a su sistema de referencia. Lo mismo para cualquier otra magnitud vectorial como, por ejemplo, la velocidad o la aceleración. De cualquier modo, una vez conocido el estado de un sistema físico, referido a un sistema de referencia dado, es posible siempre aplicar una transformación que permite referirlo a otro. Las leyes físicas, sin embargo, solo son universales si nos permiten derivar el comportamiento de un sistema físico con independencia del observador y de su sistema de referencia. Es decir, dados dos observadores, los dos deben poder aplicar las mismas leyes físicas para calcular el



comportamiento del sistema y, después, aplicar la transformación que permite pasar del sistema de referencia de uno al del otro, obteniendo el mismo resultado final. Dicho de otro modo, uno puede aplicar las leyes físicas, primero, y luego la transformación entre dos sistemas de referencia; o, al revés, primero la transformación entre los sistemas y, posteriormente, aplicar las leyes físicas. El resultado no cambiará. No puede hacerlo si la física pretende describir una realidad objetiva.

Imaginemos dos observadores, uno moviéndose con velocidad uniforme respecto al otro. Uno, por ejemplo, de pie y en reposo en el andén de una estación de ferrocarril, y otro subido a un tren que pasa, sin detenerse, con velocidad constante y en línea recta. Estos dos observadores, y sus sistemas de referencia, se denominan *inerciales* entre sí. En el caso de los sistemas inerciales, las transformaciones entre ellos se llaman *de Galileo* y, en mecánica clásica (anterior a las aportaciones de Einstein), son especialmente sencillas e intuitivas. Por ejemplo, cualquier velocidad medida por el observador subido al tren se transformará en la que mide el observador del andén por medio de la simple adición de la velocidad del tren (la suma es, obviamente, vectorial).

Regresemos ahora a la trayectoria del electrón en un campo eléctrico. Las leyes de la mecánica de Newton permiten extraer la aceleración a partir de las fuerzas. Conocida la aceleración, podemos obtener la trayectoria. Si los dos observadores inerciales, en el tren y en el andén, ven el mismo campo, los dos medirán la misma fuerza y calcularán la misma aceleración. Las trayectorias que obtendrán solo diferirán por la adición de la velocidad del tren, precisamente la transformación de Galileo entre los dos sistemas de referencia. Se puede, por tanto, transformar primero y obtener la trayectoria, o calcular la trayectoria y transformar después. El resultado es el mismo. Los dos observadores son equivalentes, los dos obtienen resultados equivalentes. Las leyes físicas no privilegian a ningún observador.

¿Y si en vez de un campo eléctrico consideramos un campo magnético? En ese caso, las cosas son muy diferentes. Las leyes clásicas del magnetismo nos dicen que una partícula que lleve carga eléctrica, como nuestro electrón, sentirá una fuerza mag-

netica en proporción a su velocidad. Pero uno de los observadores podría encontrarse al electrón en reposo, no existiendo ni fuerza magnética ni aceleración; en cambio, el otro, al medir una velocidad para el electrón, obtendría una trayectoria acelerada. Una transformación de Galileo no podría, en ningún caso, conectar las descripciones de nuestros dos observadores. ¿Qué observador tiene razón? Históricamente, no fue fácil aclararlo. Si las leyes físicas, so pena de ser declaradas incapaces de describir objetivamente la realidad, no podían privilegiar a ninguno de los observadores, la única explicación que se consideraba plausible, hasta la aparición de Einstein, era que alguna condición o propiedad del sistema físico, no tenida en cuenta aún, establecía ese privilegio. ¿Cuál?

Los físicos del siglo xx decretaron que el vacío no existía y postularon que el electrón se hallaba en una suerte de medio físico, de propiedades y cualidades casi fantasmagóricas, llamado *éter*. El campo magnético residía en el éter y la velocidad de la partícula cargada, de la que dependía la fuerza magnética, tenía que ser referida a él. Además, el británico James Clerk Maxwell (1831-1879) había demostrado que los campos eléctrico y magnético estaban relacionados de modo dinámico a través de sus famosas ecuaciones. Se inducían mutuamente cuando variaban con el tiempo. La propagación de estas variaciones, la onda electromagnética, debía realizarse por medio del éter. La luz, por tanto, viajaba en el éter. Si eso era así, la velocidad de la luz, en términos absolutos, tenía que estar referida al éter y cualquier observador inercial, moviéndose de manera uniforme respecto a él, mediría una velocidad distinta que obtendría aplicando las transformaciones de Galileo.

La solución al problema de la invariancia del electromagnetismo (o la electrodinámica, de ahí el título del artículo de Einstein de 1905) frente a transformaciones de sistemas de referen-

La única manera, por tanto, de explicar los vacíos que encuentran nuestros telescopios en incontables direcciones es suponer que la distancia de este fondo invisible [del cielo] es tan prodigiosa que ningún rayo ha podido nunca llegar hasta nosotros.

EDGAR ALLAN POE EN *EUREKA*, UN POEMA EN PROSA

era pesada por la existencia del éter, el cual tenía que ponerse de manifiesto por las diferencias relativas en la velocidad de la luz medidas por distintos observadores inerciales. Sin embargo, esas diferencias relativas resultaron no existir. Ningún intento de hallarlas prosperó. En particular, los estadounidenses Albert A. Michelson y Edward W. Morley realizaron en 1887 un cuidadoso experimento que probaba que la velocidad de la luz no dependía del sistema de referencia. Resultaba ser la misma tanto si nos movíamos en el supuesto éter como si no. Resultaba ser la misma cuando nos acercábamos hacia un foco de luz, cualquiera que fuese la velocidad, o cuando nos alejábamos de él. Sorprendente, ¿no? Más sorprendente aún fue la solución propuesta por Einstein: si las leyes físicas no dependen del sistema de referencia y la velocidad de la luz tiene que ser la misma en todos ellos, tenían que ser las sencillas e intuitivas transformaciones de Galileo las que fallaran. La audacia de su solución estaba en que las transformaciones corregidas implicaban que el tiempo dejaba de discurrir de manera única y absoluta para todos los observadores. Cada observador tenía su propio *reloj*, que medía su *tiempo propio*, y unos adelantaban con respecto a otros. A mayor velocidad del observador, más lento avanzaba su reloj. Las transformaciones entre sistemas de referencia, por tanto, también tenían que dar cuenta de la conversión entre los diferentes relojes.

Las implicaciones de las nuevas transformaciones, conocidas como *transformaciones de Lorentz*, entre sistemas de referencia inerciales eran demoledoras para el sentido común, pero resolvían el problema de las fuerzas magnéticas y explicaban por qué la luz se movía a la misma velocidad para todos los observadores. Einstein llevó la unificación de la electricidad y el magnetismo más allá de lo que lo había hecho Maxwell. El campo magnético no existía sin el campo eléctrico, siendo ambos una misma entidad que, dependiendo de su velocidad, unos observadores percibirían de un modo, y otros de otro, pero todos sentirían siempre la misma fuerza y la misma aceleración. Fruto de las nuevas transformaciones, las distancias tenían que contraerse en la dirección de la velocidad y la masa aumentar. Dado que la energía necesaria para incrementar la velocidad de un cuerpo aumenta en

## EL EXPERIMENTO DE MICHELSON Y MORLEY

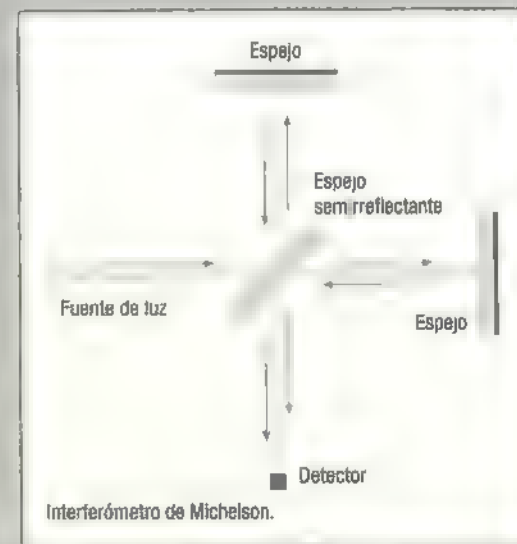
La idea de la existencia de un éter que provocaba la propagación de la luz, tal como el agua que provoca la propagación de las ondas, se descartó al observar que la velocidad de la luz era la misma en todas las direcciones, independientemente de la dirección del movimiento del observador. La idea de la existencia de un éter estacionario, y la Tierra o lo arrastraba en su traslación o no, era definitiva de validar o refutar la existencia del éter era medir la velocidad de la luz en todas las direcciones.

### Experimento inicial de Michelson

El experimento de Michelson pretendía medir diferencias en la velocidad relativa de propagación de la luz, en el sistema de referencia de la Tierra, en la dirección del flujo del éter y en la dirección perpendicular. Para ello diseñó el montaje experimental de la figura, que se conoce como *interferómetro de Michelson*. En él, un haz de luz coherente (paquete de ondas en fase) es dividido por un espejo semirreflectante en dos haces dirigidos en dos direcciones perpendiculares, siendo reflejados por dos espejos situados a distancias iguales y recombinados al incidir de nuevo sobre el espejo semirreflectante. La luz incide finalmente sobre un detector que será sensible a un posible desfase de los dos haces recombinados. La idea de Michelson era simple pero muy ingeniosa. Los haces separados, inicialmente en fase, recorrerían distancias iguales en direcciones perpendiculares, pero, si una de ellas coincidía con la dirección del flujo del éter, la velocidad de la luz se vería alterada por el propio flujo, según las transformaciones de Galileo. No en la dirección transversal. El resultado sería un pequeño desfase entre los dos haces, que generara un patrón de interferencias medible por el detector.

### Una versión mejorada

Más tarde, contando ya con la colaboración de Edward W. Morley, perfeccionó el experimento. Primero, ambos confirmaron en 1886 el resultado que el francés Hippolyte Fizeau obtuvo en 1851 demostrando que el éter, de existir, era estacionario y tenía que generar un flujo en el sistema de referencia de la Tierra. En 1887 obtuvieron un resultado negativo para la medida de dicho flujo, excluyendo la existencia del propio éter. Otros muchos experimentos, basados en el mismo principio y con similares aunque mejorados diseños, han sido repetidos desde entonces con el mismo resultado negativo.





proporción a su masa, el trabajo de aceleración también lo hará. Cuanto mayor sea la velocidad, mayor será el trabajo necesario para mantener la aceleración, hasta alcanzar el límite de la velocidad de la luz, a la que masa y trabajo se harían infinitos. Para un observador a esa velocidad, el tiempo propio se congelaría con respecto, por ejemplo, al de un observador en reposo, y las distancias en la dirección de la velocidad se harían nulas.

La consecuencia inmediata es que ningún cuerpo puede alcanzar la velocidad de la luz, excepto si se trata de partículas sin masa como los fotones, ligados a la radiación electromagnética. De manera más general, se tiene que la velocidad relativa entre dos sistemas de referencia no puede ser superior a la de la luz, infiriéndose de ello que ninguna señal o propagación de información puede viajar, tampoco, a una velocidad superior.

En el universo relativista de Einstein, los eventos o sucesos se refieren a un sistema de referencia, que incorpora su propio reloj, y se representan por un punto en el espacio y en el tiempo. Dos eventos solo pueden tener una relación causa-efecto si un rayo de luz puede salvar la distancia que los separa en un tiempo igual o inferior a su diferencia de tiempos. Es decir, si una señal, que no puede viajar a velocidades superiores a la luz, puede conectarlos. De lo contrario, ninguno de los sucesos podría tener noticia del otro antes de ocurrir y estarían desconectados causalmente. De ese modo, en el universo de Einstein, el universo finito visible que resolvía la paradoja de Olbers es, también, todo nuestro universo físico. El mundo más allá de una esfera de radio igual a la edad del universo expresada en años-luz es, en todos los sentidos, otro mundo que no tiene influencia sobre nosotros y con el que no podemos interaccionar. En realidad, son muchos mundos paralelos, tantos como esferas del mismo tamaño puedan tener cabida en el universo.

## La teoría de la relatividad general

Al establecer las correctas transformaciones entre sistemas de referencia inerciales, de suerte que las leyes físicas resultaran in-

variantes frente a ellas, Einstein había deducido las inóculas consecuencias que acabamos de describir. Pero no se quedó ahí y decidió dar una vuelta de tuerca más. ¿Y si un observador se mueve aceleradamente respecto a otro?

El movimiento entre observadores inerciales es siempre relativo. Ni las leyes de Newton ni la relatividad especial permiten distinguir si

el tren se aleja del andén o si, por el contrario, es el andén el que se aleja del tren, en sentido opuesto. Sin embargo, un observador en un sistema de referencia no inercial sigue una trayectoria acelerada y, desde su punto de vista, cualquier cuerpo libre de fuerzas se moverá con una aceleración opuesta a la suya. El sencillo experimento de observar la trayectoria de un cuerpo libre de fuerzas revelará si un sistema de referencia es acelerado o no. Pensemos en un coche tomando una curva. El vehículo sufre una aceleración denominada *centrípeta*, por la acción del rozamiento de las ruedas con el asfalto, que tira de él hacia el centro de la misma; pero sus ocupantes, ajenos a esa aceleración, mantienen su trayectoria no acelerada, es decir, rectilínea, y se sienten impelidos hacia fuera de la curva. Ese fenómeno, bien conocido y experimentado con frecuencia, suele explicarse por la acción de una fuerza ficticia denominada *centrífuga* que, en realidad, no es más que el efecto de la ausencia de fuerzas en un sistema de referencia no inercial.

Podemos tomar prestado otro ejemplo, especialmente ilustrativo, de una famosa película de ciencia ficción: *2001: una odisea del espacio*. En una memorable escena, uno de los protagonistas se ejercita, corriendo dentro de un vehículo espacial por lo que parece el interior de una gran rueda. Varios planos secuencia nos muestran al corredor con su cuerpo permanentemente en posición radial y su cabeza apuntando al centro de la rueda, recorriendo una y otra vez el perímetro interior. En apariencia, alguna fuerza de atracción con efectos equivalentes a la

Si mi teoría de la relatividad es exacta, los alemanes dirán que soy alemán y los franceses que soy ciudadano del mundo. Pero si no, los franceses dirán que soy alemán, y los alemanes que soy judío.

ALBERT EINSTEIN

propia gravedad lo sujeta al piso, en la cara interior de la rueda. De hecho, la rueda está girando y es la fuerza centrífuga la que «empuja» hacia fuera al corredor, generando el efecto como de atracción hacia el piso. Sin embargo, dicha fuerza no existe, es solo aparente. El astronauta es un cuerpo libre de fuerzas en un sistema de referencia no inercial, ligado al piso que gira con la rueda y, por tanto, siente los efectos de la ausencia de la aceleración centrípeta. Con la adecuada modulación de la velocidad angular de rotación del vehículo, el astronauta sentirá una fuerza del todo equivalente a la de la gravedad terrestre y sería incapaz, físicamente, de distinguir la una de la otra.

Este último hecho es una consecuencia del *principio de equivalencia*, que establece que las leyes físicas permanecerán, de nuevo, invariantes si transformamos sistemas acelerados en sistemas inerciales con campos gravitatorios. La razón última de esta equivalencia es la coincidencia de dos propiedades físicas, *a priori*, distintas; a saber, la *masa inercial* y la *masa gravitatoria*. De hecho, ambas se utilizan indistintamente de manera generalizada, sin reparar en que representan conceptos diferentes. La masa inercial es una propiedad dinámica, igual al cociente entre la intensidad de la fuerza aplicada sobre un cuerpo y la aceleración que este adquiere. Cuantifica la resistencia que un cuerpo ofrece a modificar su estado cinemático o de movimiento. La masa gravitatoria es la propiedad que desencadena las fuerzas gravitatorias, como la carga eléctrica lo hace con las electrostáticas. En el seno de un campo gravitatorio, un cuerpo sentirá una fuerza proporcional a su masa gravitatoria; y le ocasionará una aceleración que se obtiene dividiendo la intensidad de esa fuerza por la masa inercial. La equivalencia entre ambas conduce al hecho, bien conocido desde que en 1589 Galileo realizó su famoso experimento dejando caer dos bolas de diferente masa desde la torre inclinada de Pisa, de que la aceleración de caída de un cuerpo, bajo la acción de la gravedad, es independiente de su masa. Del mismo modo, esta equivalencia conduce a que la fuerza que necesita introducir un observador no inercial para explicar la aceleración de un cuerpo libre resulte idéntica a la fuerza que sentiría el mismo cuerpo si la aceleración fuese el resultado de un campo gravitatorio.

¿Por qué son idénticas masa inercial y gravitatoria? Para Einstein, esta coincidencia no podía ser tal y debía derivarse de un principio fundamental. Así, Einstein reformuló la ley de la gravitación de Newton, haciéndola compatible con el principio de equivalencia. Dicha reformulación de la ley de la gravitación no era más que una extensión de su teoría de la relatividad para sistemas inerciales, generalizada a sistemas no inerciales e incorporando campos gravitatorios: *la teoría de la relatividad general*.

Einstein presentó en 1915, ante la Academia Prusiana de Ciencias, sus hoy famosas ecuaciones de campo. Estas conectaban la energía y la cantidad de movimiento, y por tanto la masa inercial, con las propiedades geométricas del espacio, en particular con la curvatura. Al igual que había hecho con el tiempo en la versión especial de la relatividad, Einstein atribuyó un papel dinámico al espacio (en realidad, al espacio-tiempo, porque la relatividad especial había convertido al espacio y al tiempo en una única entidad, cinemáticamente indisoluble). Todo cuerpo, por efecto de su masa, deformaba el espacio a su alrededor, modificando su curvatura. Esta deformación del espacio, a su vez, alteraba la trayectoria seguida por cualquier otro cuerpo, en presencia del primero. El campo gravitatorio era, por tanto, una perturbación de la geometría del espacio, inducida por las masas de los cuerpos. La gravitación de Einstein es una teoría geométrica de la gravedad.

La analogía ilustrativa que suele ser más eficaz es la de comparar el espacio con una cama elástica. Si impulsamos canicas desde un lado a otro de la cama elástica, estas seguirán trayectorias rectilíneas, como corresponde a la ausencia de fuerzas y, por tanto, de aceleraciones. Supongamos, ahora, que depositamos en el centro de la cama elástica una bola mucho más masiva, como por ejemplo de los tipos usados para jugar a los bolos o a la petanca. Esta bola deforma, estirando y hundiendo, la superficie de la cama. Si repetimos el experimento de lanzar canicas, observaremos que, al cruzar la región deformada de la cama, las canicas se ven forzadas a rodear la bola masiva y curvar su trayectoria, tanto más cuanto más se aproximen a ella y más deformada esté la región surcada. Un observador que no pueda

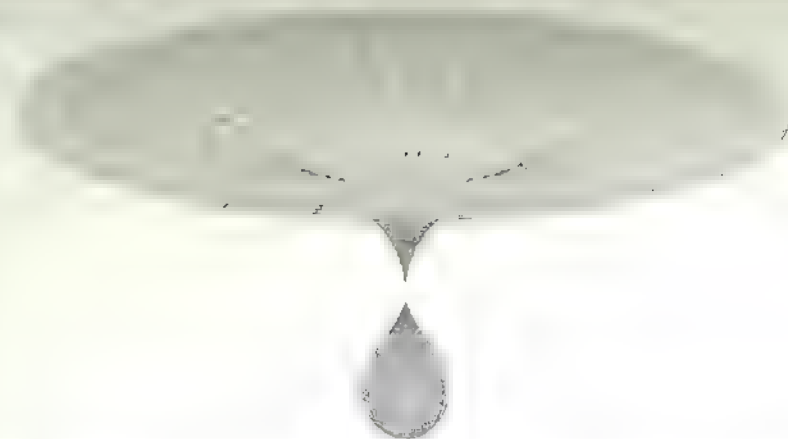


apreciar la deformación de la cama, interpretaría el resultado del experimento como consecuencia de la interacción, a distancia, entre la bola masiva y las canicas. Sin embargo, las trayectorias de las canicas no son fruto de ninguna fuerza a distancia, son el resultado del campo de deformaciones de la cama elástica, inducido por la bola. Las ecuaciones de campo de Einstein dictan el modo y grado en el que, siguiendo con la analogía, la cama elástica resulta deformada por la masa de la bola de petanca o de bolos.

Como en el caso de la versión especial de la relatividad, su generalización conduce a conclusiones extraordinariamente poco intuitivas. Por ejemplo, la trayectoria de un rayo de luz tiene que verse afectada por la deformación del espacio y se curvará, por tanto, de manera apreciable cuando surca las proximidades de un objeto muy masivo, causante de un campo gravitatorio lo bastante intenso. Además, cuando un objeto estelar suficientemente masivo colapsa, su masa se concentra más y más en un volumen cada vez menor, incrementando su densidad hasta generar un campo gravitatorio tan intenso que curvará el espacio a su alrededor, cerrándolo, e impedirá que nada escape de él. Tampoco la luz. Este objeto se conoce como *agujero negro* (figuras 1 y 2). El primer efecto descrito, una desviación de la luz, se ha constatado repetidas veces en lo que se conoce como *lente gravitatoria* (figura 3). El fenómeno de lente gravitatoria se comprobó en observaciones astronómicas por vez primera en 1919, durante la expedición dirigida por el astrónomo británico Arthur Stanley Eddington. En cuanto a la existencia de agujeros negros, existen algunas evidencias indirectas, principalmente asociadas a efectos gravitacionales y de radiación inducida, cuando se les postula como «pareja» de un segundo objeto estelar en un sistema binario o formando parte esencial del centro activo de las galaxias.

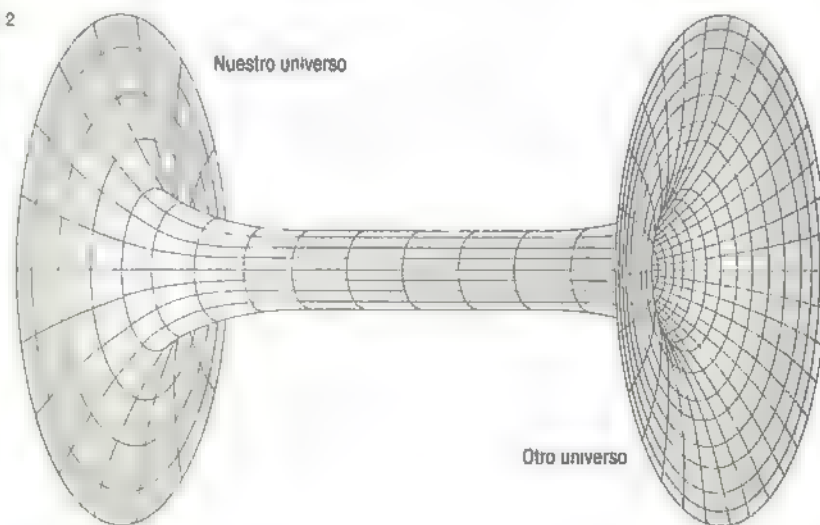
Si 1687, la fecha de publicación de los *Principia* por Newton, puede considerarse una fecha clave para la cosmología como ciencia, 1917 es, indiscutiblemente, la fecha fundacional de la cosmología moderna. En ese año, Einstein publicó los resultados que había obtenido al tratar el universo en su conjunto como un sistema descrito por sus ecuaciones de campo. Siguiendo el pre-

FIG. 1

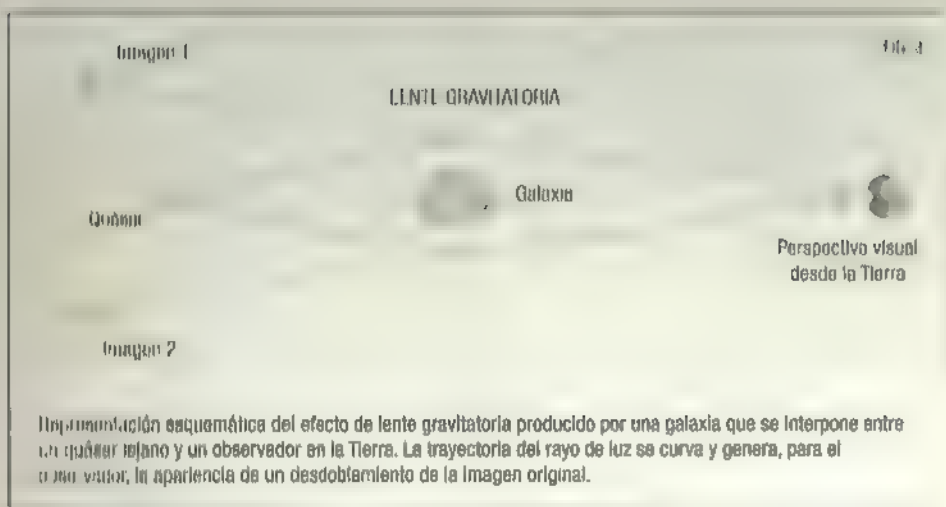


Lo que cae a un agujero negro desaparece del universo normal, quedando esencialmente aislado de este. Según una teoría de la gravedad cuántica, bajo ciertas condiciones los núcleos de los agujeros negros quizá podrían ser una región de espacio-tiempo muy curvado, en vez de una singularidad con volumen cero y densidad infinita. Eso ha dado pie a especulaciones que incluyen una hipotética conexión con un universo paralelo a través del núcleo de esos agujeros negros.

FIG. 2



Según algunas hipótesis, un agujero negro podría estar conectado a una «salida» (agujero blanco) en otro universo.



juicio generalizado, derivado del concepto newtoniano del universo, Einstein forzó su solución para que describiera un universo estático, introduciendo en las ecuaciones un término adicional conocido como *constante cosmológica*.

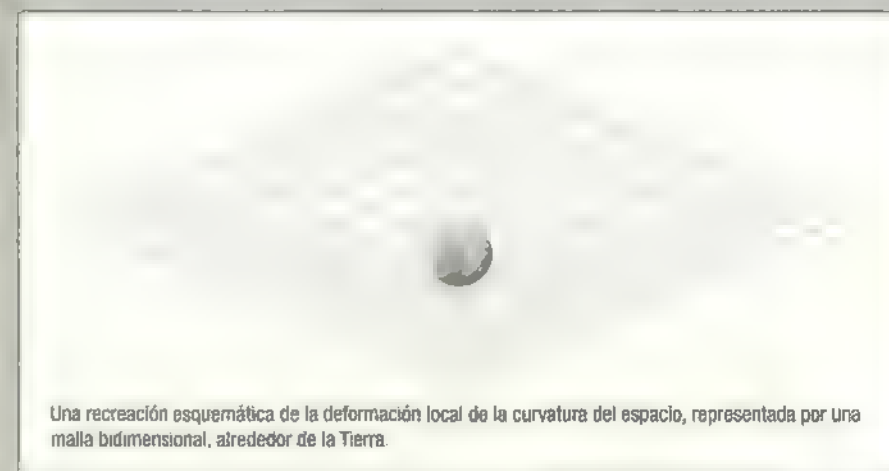
El problema de Einstein, con sus ecuaciones, era análogo al que había formulado Bentley, a partir de las de Newton. Veamos por qué. Dada la conexión entre la gravedad y la geometría, la masa y la energía total del universo curvarían el espacio, convirtiéndoles la geometría de una esfera tridimensional en un espacio de dimensión superior, una *hiperesfera*. Aunque nuestra percepción espacial tridimensional no nos permite visualizar una hiperesfera, sus propiedades geométricas pueden deducirse matemáticamente. Dichas propiedades serían análogas a las de una superficie bidimensional esférica, contenida en el espacio usual de tres dimensiones. Por ejemplo, cualquier trayectoria de curvatura mínima (equivalente a la línea recta en un espacio no curvado y denominado *geodésica* en un espacio curvo) sería una curva cerrada, una circunferencia sobre la superficie de la esfera. Como la superficie de la esfera, nuestro universo según Einstein sería ilimitado, pero finito. No habría bordes, pero en cualquier dirección en la que nos moviéramos, siguiendo una geodésica,

## LAS ECUACIONES DE CAMPO DE EINSTEIN

El tensor de curvatura de Einstein se representa por  $G_{\mu\nu}$  y sus componentes codifican la información sobre la curvatura del espacio. Las ecuaciones de campo de Einstein se sintetizan en una ecuación tensorial que relaciona el tensor de curvatura con otro tensor, representado por  $T_{\mu\nu}$ , llamado *energía momento* y cuyas componentes dan cuenta de la distribución de masa y energía del sistema. La ecuación se escribe como sigue:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz y  $G$ , la constante de gravitación universal. Así, de una forma aparentemente simple, establece la relación entre las causas de la gravedad, la masa y la energía de un sistema y sus efectos: la deformación del espacio. La constante cosmológica de Einstein está incluida en su tensor de curvatura. Sin embargo, el desarrollo de las componentes de los tensores conduce a complicadas ecuaciones, incluso en los casos de sistemas muy sencillos.





regresaríamos al punto de partida. Pero un universo así no puede ser estático, precisamente porque las fuerzas gravitatorias son solo atractivas. Newton había concebido un universo simétrico, infinito y uniforme para que las fuerzas gravitatorias resultaran compensadas con delicadeza. En el universo de Einstein, con su geometría hiperesférica, no cabría tal compensación. Usando la analogía bidimensional, el universo de Einstein sería como la superficie de un globo al que las fuerzas gravitatorias desinflarían hasta el colapso. A menos que, como Einstein hizo, se incluyera un término en las ecuaciones que ejerciera el papel de una fuerza repulsiva. Algo así como una antigravedad. Ese término es la *constante cosmológica*.

En consecuencia, el universo de Einstein era finito y estático. Y no necesitaba un principio. Pero Einstein se equivocaba.

### La fuga de las galaxias

El prejuicio de Einstein respecto al carácter estático del universo, compartido por Newton y motivado por los resultados de las observaciones astronómicas hasta el siglo xx, determinó la naturaleza de su solución de 1917. Sin embargo, también en 1917, el físico holandés Willem de Sitter publicó una solución alternativa de las ecuaciones de Einstein que representaba un caso límite alternativo. De Sitter probó que un universo carente de materia y con una constante cosmológica se expandiría de modo exponencial. Posteriormente, en 1922, el físico ruso Aleksandr Friedmann encontró una solución más general, de la cual las de Einstein y De Sitter eran casos especiales. Friedmann clasificó las diferentes soluciones en función del valor de la constante cosmológica, la densidad media de materia del universo y su tasa de expansión. La relación entre estas tres cantidades determinaba la naturaleza de la solución. En la de Einstein, densidad y constante cosmológica se cancelaban entre sí de modo exacto y no se producía expansión. Para la de De Sitter, la densidad era nula y la constante cosmológica empujaba al universo a expandirse a tasas cada vez mayores. Pero también era posible que la

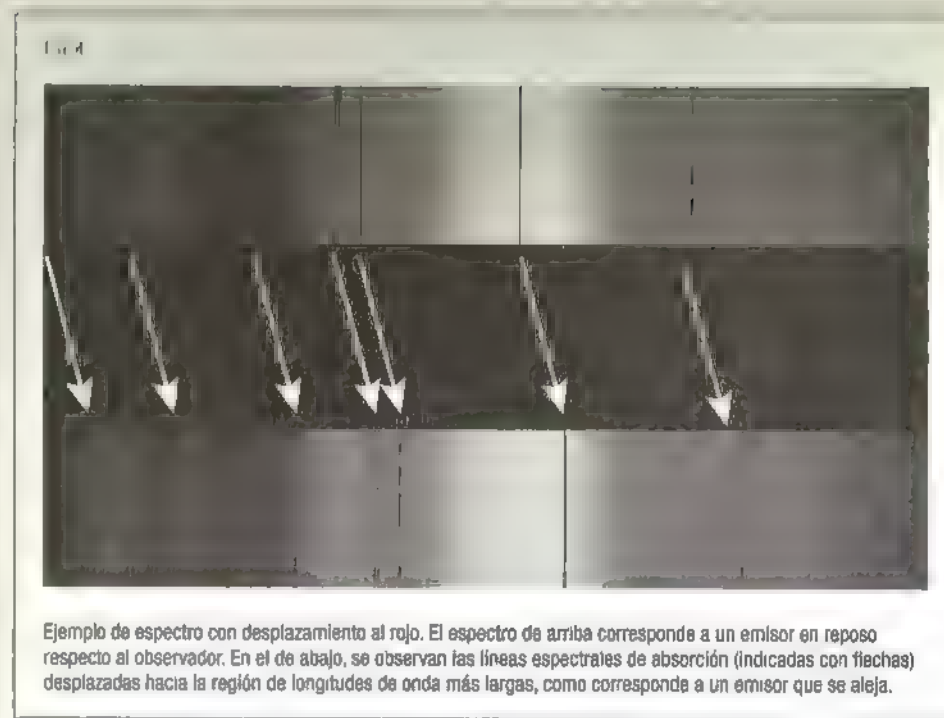
densidad de materia dominara y el universo se estuviera contrayendo, o acabara haciéndolo.

¿Que cabía esperar? ¿A un universo estático o un universo que se expandía o contraía por la falta de equilibrio entre sus fuerzas básicas? La respuesta a esta pregunta llegó definitivamente desde el campo de la astronomía y, en concreto, de la mano del astrónomo estadounidense Edwin Hubble (1889-1953). Si Einstein había proporcionado la base teórica y matemática para la construcción de la cosmología moderna, el otro gran pilar de la disciplina, integrado por la observación y la contrastación, corrió a cargo de Hubble, padre indiscutible de la cosmología observacional.

La irrupción de Edwin Hubble en el mundo de la astronomía resolvió, en primer lugar, el conocido como «gran debate», que tuvo lugar en 1920, enfrentando a los astrónomos Harlow Shapley y Herbert Curtis, y que giró en torno a la escala del universo. La cuestión, que se remontaba incluso a una disputa de Kant y Laplace, se centraba en la naturaleza de los objetos cósmicos que se describían como nebulosas espirales, y entre las que figuraba la de Andrómeda, catalogada como M31 por el astrónomo francés Charles Messier (1730-1817); así como si pertenecían a nuestra galaxia o si, por el contrario, eran distantes objetos extragalácticos, galaxias por derecho propio, similares o equivalentes a la nuestra. En el primer caso, el universo estaría compuesto únicamente por la Vía Láctea y poseería un radio del orden de cien mil años-luz; en el segundo, estaría repleto de distantes galaxias y sería mucho más vasto. Hubble, trabajando en el telescopio de Monte Wilson (California), el mayor del mundo en su momento, consiguió identificar en Andrómeda una estrella del tipo denominado *cefeida*, cuyo brillo oscila de manera regular. Puesto que, previamente, la astrónoma estadounidense Henrietta Leavitt (1868-1921) había establecido la relación entre la luminosidad de dichas estrellas y su periodo de oscilación de brillo, Hubble pudo medir dicho periodo, fijar la luminosidad y deducir la distancia a partir del brillo aparente de dicha estrella. De ese modo, estableció que Andrómeda se hallaba a, aproximadamente, un millón de años-luz de distancia, mucho más allá de

los límites de la Vía Láctea. Sin lugar a dudas, Andrómeda era otra galaxia. Una muy semejante a la nuestra, como hoy se sabe. Pero, además, Hubble había elaborado un método sistemático para medir distancias a otras presuntas galaxias. Y se puso manos a la obra.

Hubble cartografió un buen número de galaxias, determinando sus distancias a nosotros. Pero hizo algo más. Descubrió, también, que la luz que nos llegaba desde esas galaxias sufría un fenómeno que se conoce como *desplazamiento al rojo* (figura 4). La luz, como hemos explicado ya, es una onda electromagnética, la propagación espacial de las variaciones con el tiempo del campo electromagnético. Estas variaciones se descomponen en modos periódicos sinusoidales, cada uno de los cuales se caracteriza por una longitud de onda (distancia entre dos máximos consecutivos), que constituyen el espectro electromagnético. Cada color corresponde a una de estas longitudes de onda, aunque solo una pequeña región del espectro es realmente visible. La luz de las estrellas, como la emitida por el cuerpo negro que discutimos en el primer capítulo, contiene en principio todas las longitudes de onda del espectro. No obstante, como también se discutió en el primer capítulo, el hidrógeno y el helio que, esencialmente, componen las estrellas, absorben aquellas longitudes de onda que corresponden a saltos cuánticos de sus electrones. Así pues, un escrutinio del espectro de la luz estelar tiene que revelar las líneas de absorción características de estos elementos. Lo que Hubble halló fue que estas líneas de absorción tenían valores de longitudes de onda mayores de lo usual. Estaban desplazadas en el espectro (de referirnos a longitudes de onda visible, lo estarían hacia la región del color rojo). Este desplazamiento era el resultado del llamado *efecto Doppler*, conforme al cual cuando el emisor se acerca al receptor, las ondas se agolpan en la dirección del movimiento y la distancia entre máximos se estrecha; a la inversa, cuando se aleja, la distancia entre máximos se ensancha. Las longitudes de onda, por tanto, aumentan, o disminuyen, dependiendo de la velocidad relativa de emisor y receptor. De ese modo, usando el efecto Doppler, Hubble estableció que las galaxias se alejaban



de nosotros y que la velocidad con la que lo hacían era proporcional a la distancia que nos separaba de ellas. Matemáticamente, dicho descubrimiento se expresa por medio de la ley de Hubble,

$$v = H_0 D,$$

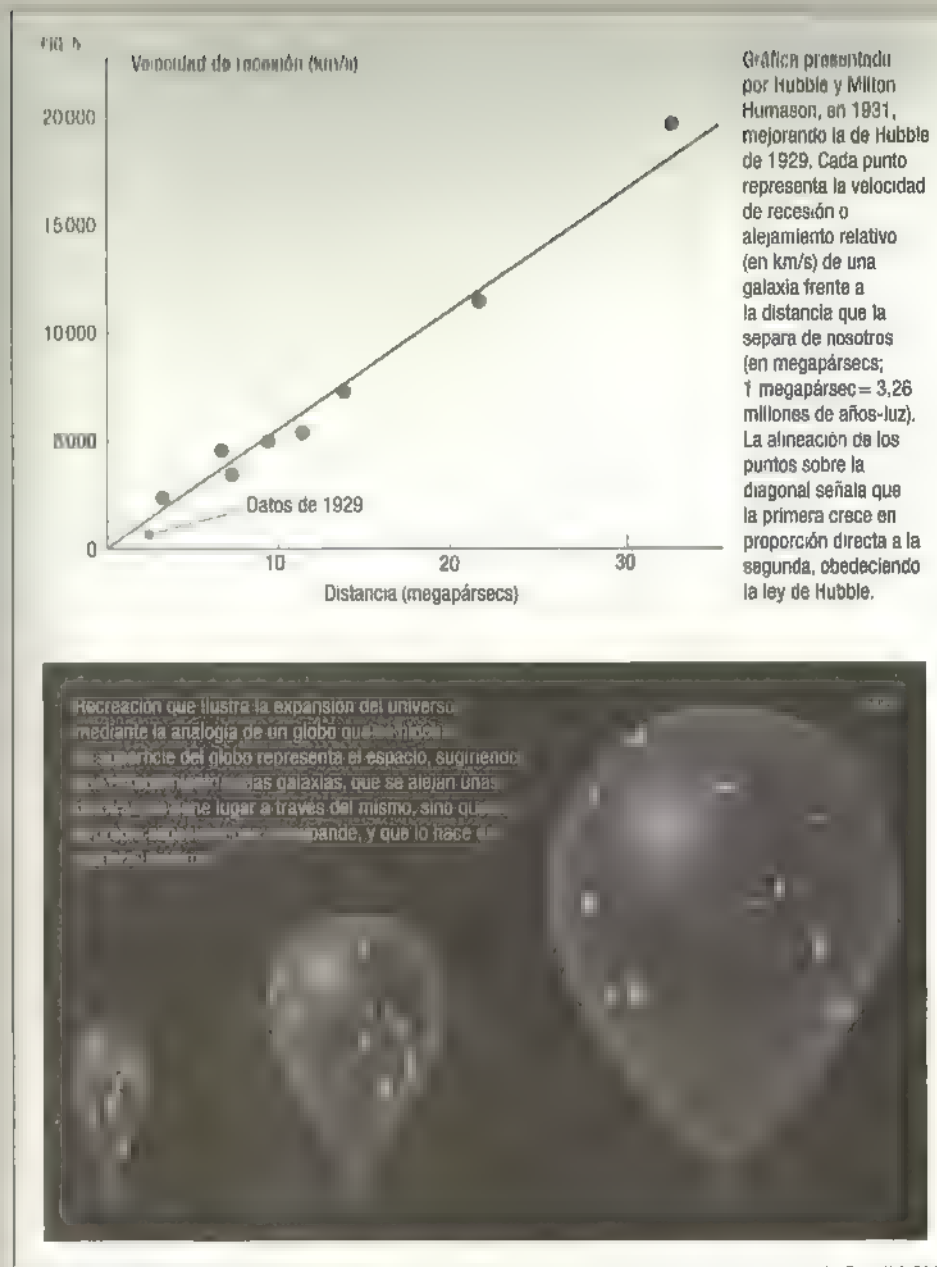
siendo  $v$  la velocidad de recesión o de alejamiento;  $D$ , la distancia que, obviamente, varía con el tiempo, y  $H_0$ , la constante de proporcionalidad, conocida como *constante de Hubble*.

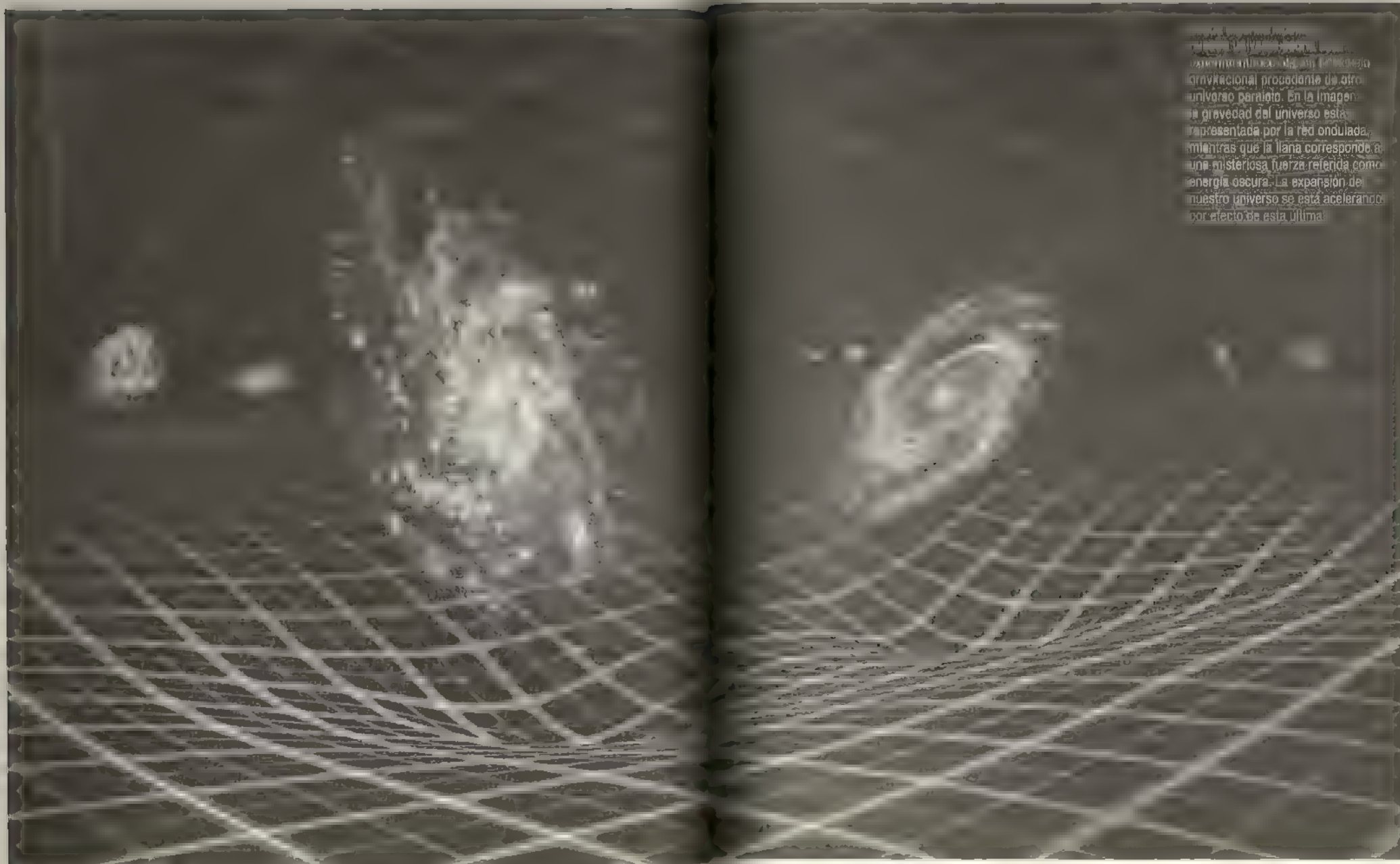
Hubble publicó sus resultados en 1929 (figura 5) y su consecuencia inmediata fue el abandono del concepto estático del universo. El universo estaba en expansión. Dicha expansión



era compatible con las soluciones de Friedmann a las ecuaciones de campo de Einstein. En particular, como De Sitter había hallado, el espacio en sí mismo, en ausencia de materia, podía expandirse. En consecuencia, si era el espacio que separaba las galaxias el que se dilataba, la dilatación crecería en proporción a la propia separación, justificando la ley de Hubble. De Sitter obtuvo su solución incluyendo la constante cosmológica introducida por Einstein, lo que conducía a un ritmo de expansión exponencialmente creciente. No obstante, la solución general de Friedmann también preveía expansiones desaceleradas, como resultado de alguna suerte de tasa inicial de expansión y del dominio de las fuerzas gravitatorias atractivas sobre las repulsivas asociadas a la constante cosmológica. Si recuperamos la analogía entre el espacio tridimensional y la superficie de un globo, la expansión descrita por la ley de Hubble se explicaría por el inflado del globo, que estiraría su superficie y alejaría entre sí, proporcionalmente a su separación, cualesquiera dos puntos localizados sobre ella (figura 6). En la analogía con la solución propuesta por De Sitter, cuanto más inflado esté el globo, mayor será el ritmo al que seguirá inflándose. En el caso de las soluciones desaceleradas de Friedmann, el ritmo decrecerá con el inflado del globo, pudiendo este frenarse o no.

El abandono del concepto estático del universo dejó sin su única justificación a la introducción de la constante cosmológica de Einstein (el propio Einstein la calificó, durante una visita a Hubble en 1931, como el mayor error de su carrera) y fue suprimida de las ecuaciones. Durante casi setenta años, los cosmólogos concibieron un universo en expansión desacelerada por la acción de la gravedad. La sola discusión se centraba en discernir si la cantidad total de masa del universo bastaba para frenar dicha expansión o, por el contrario, el universo se expandiría indefinidamente. Sin embargo, descubrimientos publicados en 1998 y 1999, merecedores del premio Nobel de Física en 2011, han constatado la expansión acelerada del universo y motivado la reintroducción de la constante cosmológica y la postulación de alguna forma desconocida de energía, denominada *energía*





La gravedad del universo está representada por la red ondulada, mientras que la llana corresponde a una misteriosa fuerza retenida como energía oscura. La expansión de nuestro universo se está acelerando por efecto de esta última.



*oscurecer*, que explique la existencia de fuerzas repulsivas a escala cosmológica. Pero esa es otra historia.

Los hallazgos de Hubble y las soluciones de Friedmann y De Sitter para las ecuaciones de Einstein condujeron a la concepción de un universo en el que el propio espacio se expandía a un ritmo dado por la constante de Hubble. La consecuencia inmediata era que, usando las ecuaciones para retroceder en el tiempo, el universo debía haber tenido un principio en el que toda la masa y toda la energía se concentraban en un volumen muy pequeño, curvado sobre sí mismo, con una densidad y una temperatura enormes. Alguna suerte de superagujero negro que, de algún modo, explotó e inició la expansión del universo. El primero que realizó esta observación fue un astrónomo y sacerdote belga llamado Georges Lemaître, quien en 1927, dos años antes de que Hubble publicara sus resultados, propuso que un universo en expansión, como solución de las ecuaciones de Einstein, tenía que haberse originado a partir de la explosión de un *superátomo* o *huevo cósmico*. Con posterioridad, en la década de los cuarenta del pasado siglo, sería el físico de origen ucraniano George Gamow el que recogería el testigo de Lemaître y desarrollaría consistentemente la historia temprana de nuestro universo, sentando dos pilares fundamentales, junto con la ley de Hubble, de la teoría del *Big Bang* (Gran Explosión). Volveremos sobre ello en el último capítulo.

Así pues, el cosmos parecía ser espacialmente ilimitado y finito, pero con una edad finita que podía estimarse, precisamente, a partir de la ley de Hubble, aceptando que el universo había estado en expansión desde su principio. En ese caso, en el presente, una región del universo conectada causalmente tendría, debido a la dilatación del propio espacio, un radio mayor que la edad del universo expresado en años-luz. La distancia que separa a dos puntos cualesquiera de un universo en expansión es mayor hoy que en el pasado, cuando una señal luminosa pudo conectarlos. Esta región conectada causalmente se denomina *burbuja de Hubble*. ¿Cuántos mundos paralelos distintos encerrados en diferentes burbujas de Hubble podría albergar el universo en expansión de Lemaître? La respuesta a esa pregunta exige que

abundemos en la teoría del *Big Bang* y en lo que hoy se conoce como *modelo estándar cosmológico*, precisando la edad del universo y evaluando su verdadero tamaño. La probable existencia de mundos o realidades que desarrollan historias paralelas, como se discutió al inicio del capítulo, está ligada a la correcta estimación de ese número de mundos posibles.

## Un mundo improbable

La detección del fondo cósmico de microondas constituyó una notable prueba empírica en favor de la validez de la teoría del Big Bang. Además, el escrutinio minucioso de esta radiación residual ha proporcionado valiosa información sobre la estructura y geometría del universo. La existencia de multiversos de diferente nivel y complejidad resulta compatible con esta nueva información.



Las ecuaciones de Einstein, los trabajos de, entre otros, Friedmann, De Sitter o Lemaitre, y las observaciones astronómicas de Hubble, habían conducido, en la década de los años treinta del siglo pasado, a la concepción de un universo finito y en expansión. La geometría del espacio era curvada, dependiendo la curvatura media del universo de la cantidad total de masa y energía que este albergara. La totalidad de la masa y energía del universo estuvo inicialmente concentrada en un volumen muy reducido, antes de una explosión colosal en la que se inició un proceso de expansión que aún hoy se manifiesta en la recesión (alejamiento) de las galaxias observada por Hubble. El astrónomo británico Fred Hoyle (1915-2001) bautizó como *Big Bang* a este evento primigenio y, sin quererlo, también a la teoría del origen y evolución del universo que acabó siendo aceptada de forma amplia y de la que, paradójicamente, fue un contumaz detractor (había propuesto un modelo estacionario alternativo).

El Big Bang marcaría el inicio del universo. Del nuestro, al menos. Poner fecha a ese evento equivalía, por tanto, a fijar la edad de nuestro universo. Si la constante de Hubble fija el ritmo de expansión, determinado este y adecuadamente implementado en

las ecuaciones de Einstein, puede estimarse con relativa precisión la antigüedad del universo. La incertidumbre de esta estimación depende del grado de exactitud y fiabilidad en la determinación de la constante de Hubble, a partir de los desplazamientos espectrales al rojo observados en las galaxias, y de nuestro conocimiento de la dinámica de la expansión del universo a través de las ecuaciones de Einstein. La nueva generación de instrumentos astronómicos, como los telescopios espaciales Hubble o Planck (que homenajean a sus insignes homónimos) o los satélites COBE y WMAP, han permitido sistemáticas y sofisticadas mediciones que han refinado la primera estimación de dicha antigüedad. Así, de los aproximadamente 15 000 millones de años calculados al principio, se ha pasado al valor actual de 13 800 millones de años, con un margen de error de unos 40 millones.

El tamaño del universo está muy ligado a su geometría que, a su vez, estará determinada por las ecuaciones de Einstein. Una curvatura negativa corresponde a un universo abierto y espacialmente infinito. Una curvatura positiva será una indicación de un universo cerrado y finito. Aun siendo positiva la curvatura, cuanto más cerca de cero, mayor, aunque finito, será el volumen del universo.

¿Cómo podemos medir la curvatura media del universo? O, si este emergió de la expansión a partir de un volumen muy reducido o, como veremos, una singularidad, ¿cuál es el tamaño global del universo después de 13 800 millones de años de expansión desde el Big Bang? ¿Puede ese tamaño superar en mucho a los 13 800 millones de años-luz? La respuesta a esas preguntas, muy relevantes además para el tema que nos ocupa, nos va a requerir profundizar en el modelo estándar cosmológico. Un modelo que se inició en los años cuarenta y que, en lo esencial, fue completado por el trabajo de Alan Guth en los ochenta y por el descubrimiento de la energía oscura a fines de los noventa. Vamos a ello.

## EL ECO DE LA CREACIÓN

Los astrónomos y cosmólogos, en las décadas de los treinta y los cuarenta, aún debatían sobre la cuestión de la dinámica expansi-

va o estacionaria del universo. La ley de Hubble supuso una incuestionable constatación de la recesión de las galaxias y de la dilatación del espacio

a grandes distancias intergalácticas. A escalas intragalácticas, en cambio, o dentro de agrupaciones locales de galaxias, la atracción gravitatoria dominaba sobre la dilatación del espacio y no se observaba la expansión. Sin embargo, después de la Segunda Guerra Mundial, el reputado astrónomo Fred Hoyle propuso un modelo en el que, fruto de una violación indetectable de la conservación de la masa y la energía, nuevas galaxias surgirían de la nada para reemplazar a las que se alejaban, manteniendo el universo homogéneo y estacionario en una escala de tiempo suficientemente grande. Por otra parte, el modelo de universo oscilante era, de algún modo, un intento de salvar la naturaleza estacionaria del universo, en una escala de tiempo aún mayor (la necesaria para que un nuevo Big Bang, tras un Big Crunch o implosión, reprodujera un nuevo universo con la misma estructura).

La principal motivación que empujó a brillantes científicos a buscar alternativas, en ciertos casos bastante exóticas, al modelo del Big Bang, residía principalmente en el rechazo que despertaba el concepto de origen del universo, no demasiado ajeno al de creación y, en opinión de muchos, dotado de connotaciones religiosas. Por su parte, Lemaître argumentó, certeramente, que el Big Bang no era un evento primigenio que desencadenaba una expansión del universo en el espacio y en el tiempo; el Big Bang generaba el propio tiempo y el espacio a partir de lo que él denominó *huevo primigenio*. La repugnancia intelectual hacia el concepto de origen del universo se debía al cuestionamiento paradójico sobre un *antes* de ese origen. Pero si no había tiempo antes del Big Bang, tampoco habría un *antes*. La paradoja, como muchas otras, nacería de un error de formulación.

Trabajos posteriores de Roger Penrose y Stephen Hawking, entre otros muchos, han abundado en la idea de un origen del tiempo a partir de la singularidad que se produjo cuando toda la masa y la energía del universo se concentraba en un único punto. Una singularidad que sería de la misma naturaleza que la que

La historia de la astronomía es una historia de retroceso de horizontes.

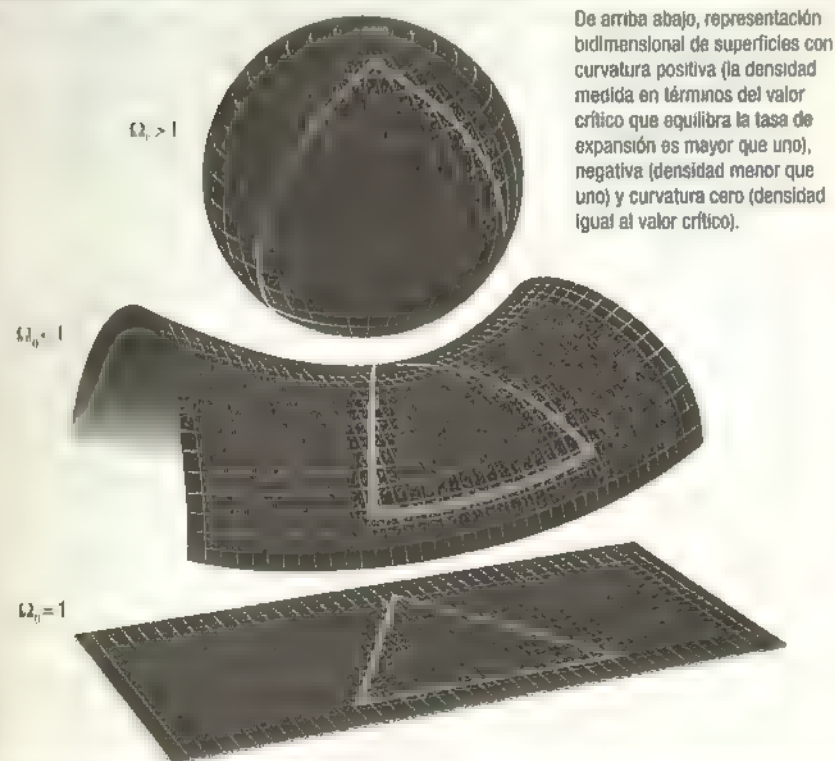
EDWIN HUBBLE



## CURVATURA Y DESTINO DEL UNIVERSO

La curvatura del espacio-tiempo depende de la densidad de materia y energía que contiene. Si la densidad es suficiente para que la gravedad supere a la expansión, el universo se contraerá y se producirá un big crunch. Si la densidad es menor, el universo se expandirá indefinidamente. El destino del universo depende de la curvatura del espacio-tiempo, que a su vez depende de la densidad de materia y energía que contiene. Si la densidad es suficiente para que la gravedad supere a la expansión, el universo se contraerá y se producirá un big crunch. Si la densidad es menor, el universo se expandirá indefinidamente.

FIG. 1

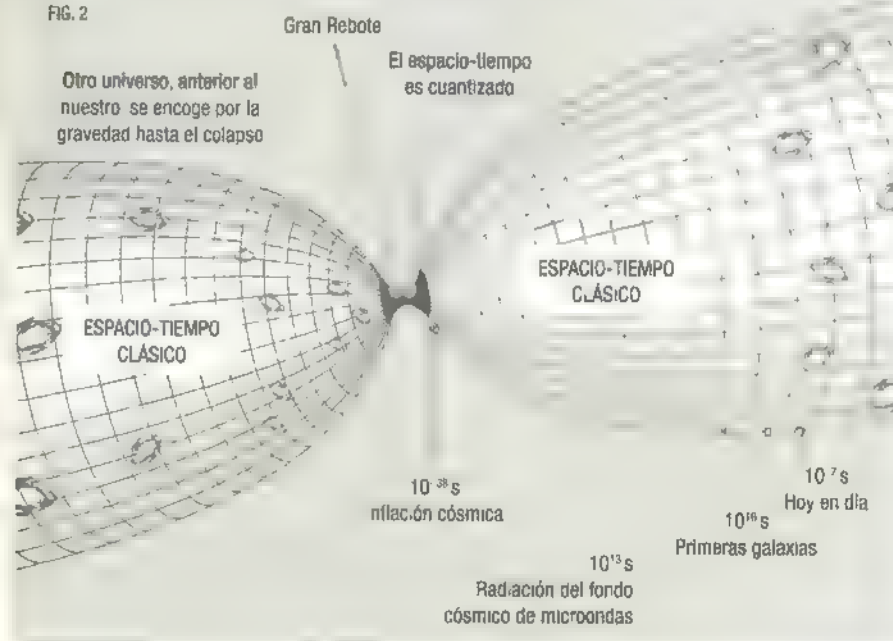


El big crunch sería el punto final de la expansión del universo, que se volvería un universo más pequeño.

## ¿Proceso cíclico?

Por ejemplo, en la década de 1930 Einstein y Richard C. Tolman, entre otros, consideraron y discutieron un modelo de universo oscilante en el que expansiones y contracciones, big bangs y big crunches, se sucedan eternamente. En ese caso, cada fase de expansión conduciría a una nueva historia del universo, de todo desconectada e independiente de las anteriores, y sin influencia causal sobre las posteriores. De hecho, cada big crunch debe estar conectado a un big bang por una singularidad en la que, hasta donde se sabe hoy día, el tiempo y el espacio son destruidos y creados de nuevo (figura 2).

FIG. 2



Representación esquemática de un big crunch y un posterior big bang que encadena en una especie de «Gran Rebote» dos universos desconectados causalmente, en la teoría de universos oscilantes.

Preocuparse qué había antes del Big Bang es como preguntarse qué hay al norte del polo Norte.

STEPHEN HAWKING

bajo estas condiciones, los efectos cuánticos de la gravedad tienen que ser relevantes y su descripción por medio de las ecuaciones de Einstein, insuficiente. En consecuencia, el marco teórico del que se dispone, aun hoy, para proyectar hacia atrás en el tiempo la evolución del universo hasta el Big Bang no es del todo satisfactorio. No lo es, precisamente, cuando nos acercamos al instante del Big Bang.

Pero regresemos a los años cuarenta. Y, en particular, centrémonos en una figura que resultó decisiva para la aceptación de la teoría del Big Bang: el físico de origen ucraniano George Gamow. Su trabajo teórico en el campo de la cosmología proporcionó dos sólidos argumentos a favor de un universo en expansión, a partir de un evento primigenio como el Big Bang, y que, en el pasado, había atravesado por una fase temprana muy densa y caliente. Estos dos argumentos se refieren a la *nucleosíntesis primordial* y al *fondo cósmico de microondas*. Veamos en qué consisten uno y otro.

Los elementos de la tabla periódica, desde el hidrógeno hasta el último elemento sintetizado hasta ahora, el ununoctio, están compuestos por protones y neutrones, que se concentran en el núcleo identificado por Ernest Rutherford (1871-1937), y por electrones, que ocupan los orbitales cuánticos que señalamos en el primer capítulo. Lo que distingue a un elemento de entre los demás es la cantidad de protones, cargados positivamente, que encierra en su núcleo, cuya carga eléctrica está compensada por un número equivalente de electrones, haciendo del átomo no ionizado una entidad eléctricamente neutra. Cada elemento puede contar además con diferentes variantes de núcleo, llamados *isótopos*, que se diferencian por el número de sus neutrones. Gamow razonó como sigue. Muy poco después del Big Bang, algunos minutos, el universo debía ser una bola caliente de proto-

ne debe generar en un agujero negro. Este último caso, a menor escala, podría reproducir las condiciones de densidad y temperatura que debían darse en los instantes posteriores al Big Bang. No obstante, en un sistema

nes, neutrones y electrones. Recordemos que la temperatura de un sistema es una medida promedio relacionada con la energía cinética de sus componentes. Por tanto, caliente significa que protones, neutrones y electrones portan mucha energía. En esas condiciones, debían darse una serie de reacciones nucleares, que denominamos de  *fusión*, que tendrían como resultado la formación, primero, de deuterio (isótopo del hidrógeno con un protón y un neutrón) y núcleos de helio-4 (formados por dos protones y dos neutrones) y posteriormente, por captura de neutrones, uno a uno, el resto de núcleos estables que encontramos para los elementos que componen la tabla periódica. Gamow y su alumno Ralph Alpher (1921-2007) identificaron esas reacciones nucleares y, a partir de ellas, calcularon las proporciones esperables de los diferentes núcleos en el universo. A este proceso se le conoce como *nucleosíntesis primordial* y explicaría de manera satisfactoria las proporciones relativas de hidrógeno y helio observadas en el cosmos. Las abundancias del resto de núcleos, sin embargo, solo serían explicadas por medio de la nucleosíntesis estelar.

La teoría de Alpher y Gamow explicaba las proporciones relativas o abundancias de hidrógeno y helio que, sin más que estudiar la composición de las estrellas y el gas interestelar, podían observarse en el universo: un núcleo de helio por cada tres de hidrógeno. Sin embargo, la nucleosíntesis primordial no podía explicar la génesis de los elementos mucho más allá del helio. Fue Fred Hoyle, junto a su equipo de colaboradores, el que acabó completando el rompecabezas. Arthur Stanley Eddington (1882-1944) había propuesto anteriormente el corazón de las estrellas como un medio con las condiciones adecuadas para la nucleosíntesis. A finales de los años cincuenta, Hoyle, Geoffrey y Margaret Burbidge y William Fowler desarrollaron esta idea, identificaron las reacciones nucleares requeridas y realizaron minuciosos cálculos que arrojaron abundancias de elementos más allá del helio claramente compatibles con las medidas en el universo. La nucleosíntesis estelar era pues en esencia el proceso responsable de la creación de los elementos más allá del helio, y complementaba el trabajo hecho por la nucleosíntesis primordial.



Después del Big Bang, el espacio-tiempo comenzó a expandirse y el universo a enfriarse, permitiendo la formación de los primeros núcleos: protones y neutrones. El universo estaba aún lo suficientemente caliente para que se dieran las reacciones nucleares que formarían los núcleos de helio (formado por dos neutrones y dos protones). Solo por debajo de la temperatura de recombinación, unos 3000 K, los núcleos ligeros se recombinaron y se formaron los primeros átomos.

La gravedad concentraría el hidrógeno y el helio para formar las primeras estrellas. El colapso gravitatorio elevaría la temperatura del núcleo hasta permitir la ignición del combustible estelar: la fusión termonuclear del hidrógeno en helio, en diferentes fases. La elevación de la temperatura del núcleo, en la que se concentraría el helio, primero, y los núcleos más pesados después, permitiría otras reacciones de fusión y de captura de neutrones que, junto con desintegraciones radiactivas, conducirían a la formación de esos núcleos más pesados, hasta el núcleo de hierro.

#### FABRICAS DE ELEMENTOS PESADOS

En el interior de las estrellas se producen los elementos más pesados que el hidrógeno y el helio. Algunos de ellos se producen en las supernovas, otros en los procesos de captura de neutrones que ocurren en las estrellas más masivas que el Sol. Los elementos más pesados que el hierro se forman en las supernovas.

Big Bang

H	He
Li	Be
Na	Mg
K	Ca
Rb	Sr
Cs	Ba
Fr	Ra
La	Ce
Ac	Th

Al enfriarse el universo, se forman los primeros núcleos de hidrógeno (deuterio y tritio) y de helio. Unos 380.000 años después del Big Bang, los núcleos capturan suficientes electrones y se forman átomos neutros (recombinación).



Átomo de helio

Estrella semejante al Sol

En el interior de las estrellas se sigue formando helio y núcleos más pesados.

Átomo de hierro

Formación de núcleos más pesados que el hierro.

Supernova (para estrellas más masivas que el Sol)

El Big Bang, pocos minutos después del principio, proporcionaría el «caldero cósmico primordial» para los elementos químicos más ligeros. El resto se «cocinaría» posteriormente en el corazón de las estrellas.

Gamow no se quedó en la nucleosíntesis ocurrida pocos minutos después del Big Bang. Él y sus colaboradores Ralph Alpher y Robert Herman continuaron con su relato de la evolución del universo desde el Big Bang. Pensaron que mientras la «bola» muy caliente que era el universo estuvo compuesta de núcleos cargados y electrones libres, un rayo de luz tenía que ser dispersado con rapidez por algún electrón. Los fotones viajarían, por tanto, a distancias muy cortas y el universo sería fundamentalmente opaco. Los núcleos, sobre todo de hidrógeno y helio, formarían átomos al ligar electrones. Pero, por encima de cierta temperatura crítica, la agitación térmica generaría colisiones que romperían de inmediato esos mismos átomos, manteniendo un universo compuesto por una sopa de partículas cargadas eléctricamente. Sin embargo, el universo continuaría su expansión, y el consecuente enfriamiento (del mismo modo que un gas se enfría al expandirse sin aporte externo de calor) hasta bajar de dicha temperatura crítica, que puede estimarse en unos 3000 K (0 K, el *cero absoluto*, corresponde a unos  $-273^{\circ}\text{C}$ , la temperatura más baja que permiten las leyes de la física). Hoy se estima que en aquel momento, unos 380 000 años después del Big Bang, los electrones se ligaron de manera estable a los núcleos, formando átomos eléctricamente neutros, y el universo se tornó transparente. Los fotones, al ser dispersados de una manera muchísimo más ineficiente, podían continuar su viaje indefinidamente, en todas direcciones por igual, a través de un universo que se expandía y enfriaba. Y eso podía permitirles seguir viajando hasta incluso hoy, siendo potencialmente detectables desde cualquier punto del universo. También desde la Tierra.

Gamow demostró en 1948 que durante la fase opaca posterior al Big Bang, en la que los fotones eran continuamente dispersados por electrones, la radiación alcanzaba el equilibrio térmico con la materia y debía estar caracterizada por la distribución espectral propia de un cuerpo negro. Como sabemos desde el

primer capítulo, dicha distribución espectral solo depende de la temperatura. En consecuencia, dado que toda la radiación posterior al Big Bang permaneció en equilibrio térmico hasta alcanzar los 3000 K, para empezar entonces a circular libremente y llenar de manera uniforme el cosmos, faltaba tan solo estimar el efecto de la expansión relativista, desde entonces hasta nuestros días, sobre esta radiación de fondo que de-

bía llegarnos uniformemente desde todas direcciones. Alpher y Herman estimaron que dicha radiación de fondo, como un débil eco de la creación, debía concordar con la radiación de un cuerpo negro a unos 5 K (es decir, aproximadamente  $-268^{\circ}\text{C}$ ). Ese valor de temperatura situaba el grueso del espectro en el rango de las microondas, y resultaba tan fría que hacía muy difícil su detección. Al menos en 1948.

El eco de la creación, la radiación del fondo cósmico de microondas predicha por Gamow, Alpher y Herman, se detectó finalmente en 1965. Y, como tantas otras veces en la historia de la ciencia, este trascendental descubrimiento que ofrecía una sólida evidencia de la validez de la teoría del Big Bang, fue guiado por el azar. Arno Penzias y Robert Wilson trabajaban con un radiotelescopio de 70 m de diámetro, del laboratorio Bell en Holmdell (Nueva Jersey, Estados Unidos), cuando encontraron lo que creyeron unas indeseadas interferencias al apuntar con su radiotelescopio a los cielos, en busca de señales de radio. Procedieron a limpiar con sumo cuidado la superficie del radiotelescopio, en particular de excrementos de pájaro, con la convicción de que el origen de las interferencias era algún depósito de porquería. Al volver a medir, la presunta interferencia era más intensa, llegaba uniformemente desde todo el cielo y lo hacía en el rango de las microondas. En particular, el espectro era compatible con el de un cuerpo negro a 2,7 K ( $-270,3^{\circ}\text{C}$ ). Sin saberlo, Penzias y Wilson habían sintonizado el eco del Big Bang. Ambos recibie-

Cuando le preguntaron a san Agustín «¿Qué hizo Dios antes de crear el universo?», él no contestó [...]. En cambio, dijo que el tiempo era una propiedad del universo que Dios creó, y que ese tiempo no existió antes del comienzo del universo.

STEPHEN HAWKING



ron el premio Nobel de Física en 1978 por este descubrimiento accidental.

## EL PROBLEMA DEL HORIZONTE Y LA INFLACIÓN

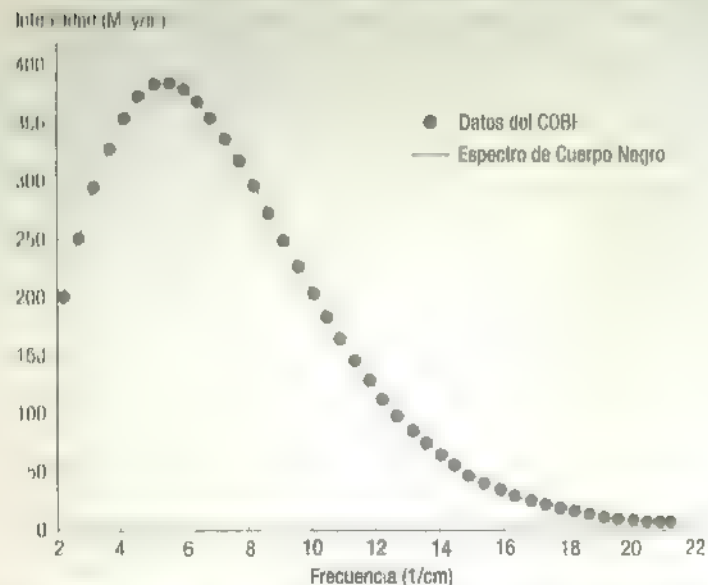
Penzias y Wilson, con su descubrimiento, dieron un notable espaldarazo a la teoría del Big Bang. La ley de Hubble, la predicción de las abundancias de los elementos y la detección del fondo cósmico de microondas, son consideradas como sus tres pruebas más firmes. Además, el fondo de microondas abría directamente una ventana a la observación de una fase temprana en la evolución de nuestro universo. Observación que, por medio de datos precisos de la distribución espectral de la radiación o de su misma distribución espacial en el cielo, podía proporcionar una información valiosa sobre el universo como sistema y su evolución. La cosmología progresaba desde una ciencia fundamentalmente especulativa hacia una disciplina experimental. Así, empezaron a diseñarse instrumentos y proyectarse observaciones o experimentos que, a partir de la década de los noventa, abrieron una nueva era en la cosmología moderna: la de la precisión.

Sin embargo, la detección del fondo cósmico de microondas dejaba también pendientes de respuesta algunas preguntas, siendo la principal de ellas la asociada al *problema del horizonte*, que puede describirse como sigue. El universo se torna transparente unos 380 000 años después del Big Bang, en el instante de la recombinación. En ese momento, en el que cesa la dispersión de fotones por electrones, el equilibrio entre materia y radiación solo puede extenderse a una región del espacio conectada causalmente. Para un punto cualquiera del espacio en un instante dado, dicha región quedará definida por la máxima distancia recorrida por un fotón, emitido desde ese punto, en el intervalo de tiempo entre el Big Bang y ese instante. Los límites de dicha región conformarán lo que se conoce como el *horizonte cosmológico* para ese punto. Ahora, tomando como referencia el punto del espacio en el que hoy se localiza la Tierra, consideremos el horizonte cosmológico en el instante de la recombinación, 380 000 años después del

Big Bang. Y comparemos la región que define dicho horizonte con aquella desde la que un fotón emitido entonces podría ser detectado desde la Tierra en el presente. La primera región está determinada por la distancia recorrida por la luz desde el Big Bang hasta la recombinación y la correspondiente dilatación del espacio en esos 380 000 años. La segunda, por la distancia máxima que la luz puede recorrer en el intervalo desde la recombinación hasta el presente, muy poco menos de 13 800 millones de años. La primera define la región en equilibrio térmico cuando la radiación de fondo fue emitida. La segunda es la región cuyo fondo cósmico podemos ver hoy. En ambos casos nos referimos a regiones del espacio en el instante de la recombinación (podemos trasladarlas al presente, aplicando la correspondiente dilatación fruto de la expansión del espacio, desde ese instante hasta el presente). El problema estriba en que, pese a que la primera región parece ser muchísimo más pequeña que la segunda, todo el fondo cósmico de microondas detectado desde la Tierra es extraordinariamente uniforme e isótropo (es decir, nos llega la misma radiación desde todas las direcciones, medida con cualquier ángulo en el cielo). Si el horizonte cosmológico en el instante de la recombinación era demasiado pequeño y nos está llegando radiación de regiones que no estaban, entonces, en contacto causal, ¿cómo pueden estar todas esas regiones exactamente a la misma temperatura? Este es precisamente el problema del horizonte: dos regiones que aparentemente se deberían haber desarrollado de manera independiente, lo han hecho de manera muy parecida.

Medido en cualquier punto del cielo, el espectro del fondo cósmico se comporta casi perfectamente como el de un cuerpo negro en equilibrio térmico a 2,726 K, con un error aproximado en la determinación de una milésima de grado (figura 1). Semejante uniformidad para la distribución de temperaturas suponía una flagrante e inaceptable violación de las leyes relativistas. La solución a este misterio cósmico llegó de la mano de Alan Guth, en la década de los ochenta. Guth identificó un mecanismo, basado en las leyes fundamentales que los físicos de partículas elementales estaban revelando, que justificaría una expansión exponencialmente acelerada del universo, del tipo sugerido por De Sitter,

# EL FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS CAPTADO POR EL COBE



Datos publicados por la NASA (agencia espacial estadounidense), obtenidos por el satélite astronómico COBE, para la distribución espectral de la radiación del fondo cósmico y su comparación con la curva teórica para un cuerpo negro a 2,726 K. La concordancia es perfecta.

en una de sus fases tempranas. Más adelante describiremos este mecanismo pero, cualquiera que este sea, si el espacio se dilata durante suficiente tiempo y a un ritmo lo bastante alto, el problema del horizonte quedaría resuelto. Basta con que, en los primeros 380 000 años tras el Big Bang, la expansión exponencialmente acelerada del universo dilate el horizonte cosmológico hasta hacerlo mayor que la región de visibilidad (cuyo radio es del orden de decenas de miles de millones de años-luz). La relatividad especial no impide que el tamaño del universo crezca con el tiempo a velocidades superiores a la de la luz. Es el espacio el que se dilata, sin propagación de información.

El proceso de expansión acelerada se conoce como *inflación* y, por razones que entenderemos más adelante, Guth propuso

que nuestro universo debió sufrirlo muy poco después de su nacimiento:  $10^{-32}$  segundos después. La inflación debió finalizar solo  $10^{-32}$  segundos después del Big Bang pero, en ese irrisoriamente pequeño intervalo de tiempo, el universo debió inflarse, al menos, 10 000 millones de veces. Si Guth tenía razón, el universo podía ser abrumadoramente más grande que el universo visible.

## EL TAMAÑO DEL UNIVERSO Y LOS MUNDOS PROBABLES

La inflación cósmica resolvía una segunda cuestión que podríamos definir como el problema de la curvatura. La curvatura del universo hoy es próxima a cero. Al parecer, la geometría de nuestro universo es plana (las desviaciones debidas a una posible geometría curvada, si las hay, son inapreciables de manera directa). La curvatura está determinada por la relación entre la densidad media de la masa y la energía encerradas globalmente en nuestro universo y su tasa de expansión. Así, la curvatura es cero cuando la densidad alcanza cierto valor crítico que equilibra exactamente la tasa de expansión. Sin embargo, tanto la densidad como la tasa de expansión varían con el tiempo, debido a la dinámica evolutiva del universo dictada por las ecuaciones de Einstein. Por tanto, si aún hoy, después de 13 800 millones de años de expansión, el valor de la densidad es cercano al valor crítico, ha de concluirse que el valor inicial debió ajustarse con una singular precisión al valor crítico. Por ejemplo, si el valor actual de la densidad presente fuera la décima parte del valor crítico, su valor un segundo después del Big Bang debería haber sido igual al crítico con una precisión de una parte en 10 000 millones!

Si en el mencionado *ajuste fino* inicial de la densidad, la expansión del universo habría sido más rápida o, por el contrario, se habría frenado. De haber sido más rápida, el universo hoy sería abierto y mucho más frío (con curvatura negativa). De haberse frenado, hoy el universo sería cerrado y mucho más caliente (con curvatura positiva), e incluso es probable que se hubiera



iniciado el proceso hacia una «implosión» del universo, un fenómeno de signo contrario al Big Bang y que algunos cosmólogos han denominado *Big Crunch*. Pero ¿cómo se explica un ajuste fino tan delicado? La respuesta de Guth es simple: la inflación hiperacelerada aplanó el universo en sus primeros instantes de evolución, llevando la curvatura a un valor casi nulo y, en consecuencia, dándole a la densidad un valor finamente ajustado a su valor crítico. La pregunta que procede hacer ahora es ¿cuánto duró la inflación y cómo de plano llegó a ser el universo? O, lo que es lo mismo, ¿cómo de grande es el universo hoy?

La respuesta a estas preguntas puede emerger, una vez más, del análisis preciso y detallado del fondo cósmico de microondas. Como demostraron Edward Harrison, Philip James Edwin Peebles y Yakov Zeldóvich en 1970-1972, el universo primordial antes de la recombinación no habría podido ser completamente homogéneo. A una escala lo bastante pequeña como para que los efectos cuánticos se manifestasen, debieron existir inhomogeneidades que han tenido que dejar alguna huella en el fondo cósmico. Estas fluctuaciones de origen cuántico debieron trasladarse al fondo en forma de sutiles anisotropías, pequeñísimas variaciones en la distribución de la temperatura en el cielo, del orden de una parte en 10 000 o 100 000. Un estudio detallado de la radiación del fondo, por medio del satélite COBE (siglas en inglés de «explorador del fondo cósmico»), de la NASA, confirmó la existencia de estas anisotropías en 1992. Posteriormente, otros experimentos con mayor capacidad de resolución espacial y mayor sensibilidad, como BOOMERanG (siglas en inglés de «observaciones en globo de radiación extragaláctica milimétrica y geofísica») o WMAP (siglas en inglés de «sonda Wilkinson para anisotropías de microondas»), han analizado minuciosamente la estructura de estas anisotropías (véase la pág. 73). Dicha estructura depende también de los detalles de la teoría del Big Bang que incorpora, además de la evolución del universo, su descripción fenomenológica en eras primordiales por medio de la física de partículas o la física nuclear (hoy se conoce a esta síntesis teórica como *modelo estándar cosmológico*). Así, de la comparación de las predicciones teóricas con las medidas de

la anisotropía en el fondo cósmico podemos deducir el valor de algunos parámetros fundamentales del modelo. En particular, la densidad de masa y energía y la curvatura del universo.

Los datos obtenidos por todos los experimentos recientes enfocados al escrutinio de las anisotropías del fondo cósmico apuntan en la dirección de un universo prácticamente plano y casi infinito. De hecho, si se tienen en cuenta las incertidumbres en las medidas experimentales, los resultados son compatibles con una curvatura nula (una densidad exactamente igual a la crítica). Así pues, tras la revisión relativista, la adecuación a las más recientes y precisas observaciones astronómicas y la aplicación de las leyes fundamentales de la materia y sus interacciones, la cosmología moderna sigue presentando un universo con una edad finita pero espacialmente infinito, o casi. Un universo con un número infinito de burbujas de Hubble (véase la imagen de las págs. 130-131), o casi.

En el tercer capítulo, tras introducir el universo newtoniano homogéneo e infinito y considerando, también allí, la necesidad de una edad finita (para evitar la paradoja de Olbers), discutimos la existencia de una infinidad de mundos desconectados causalmente que, por necesidad, debían repetir historias. Ahora sabemos que, unos 380 000 años después del Big Bang, después de la recombinación, el universo estaba compuesto esencialmente por átomos de hidrógeno y helio (algo de litio, también). Y su distribución era uniforme, tal como se deduce del fondo cósmico de microondas y de su distribución de anisotropías. A gran escala, la distribución de galaxias que observamos hoy es también uniforme. Desde entonces, el universo ha continuado su expansión durante unos 13 800 millones de años, se ha enfriado y ha ido evolucionando y generando estructuras de complejidad creciente. Teniendo en cuenta la expansión del universo y tomando como instante inicial el periodo de recombinación, el horizonte cosmológico en el presente tiene un radio aproximado de 42 000 millones de años-luz. Tal es el radio actual de la burbuja de Hubble.

El número de posibles configuraciones de toda la materia y la radiación encerradas en una de esas burbujas puede ser, sin



Los burbujas de Hubble, con un radio que puede  
alcanzar un uno 42 000 millones de años-luz,  
son «islas» aisladas las unas de las otras, llenando  
un espacio infinito o casi infinito, en el que las  
configuraciones de los mundos tienen que repetirse  
por mera probabilidad.




lugar a dudas, inminente (véase la imagen de las págs. 134-135). Pero es infinito. Si el universo es infinito o suficientemente vasto, esas configuraciones tienen que repetirse. Algunos cosmólogos, entre ellos Max Tegmark, han realizado algunas estimaciones sobre la distancia promedio, en metros, que separaría dos burbujas de Hubble idénticas. El número escapa a nuestra capacidad de ponderación: se trata de 10 elevado a 10 elevado a 128. Es decir, ¡un 1 seguido de  $10^{128}$  ceros! Pero, si el universo es lo bastante grande, habrá mundos idénticos y se repetirán historias. De cualquier modo, un universo compuesto por una infinidad de burbujas de Hubble constituye un multiverso de tipo I. La cosmología moderna parece apuntar a que nuestro universo lo es.

## LA INFLACIÓN CAÓTICA ETERNA Y EL MUNDO IMPROBABLE

El modelo estándar cosmológico es una síntesis teórica que incorpora las ecuaciones de Einstein para la descripción de la evolución del universo, regida por la gravedad, y la física nuclear y de partículas para la descripción de los procesos en sus eras primordiales. En particular, George Gamow, en la década de 1940, había proyectado las ecuaciones de Einstein hacia atrás en el tiempo, hasta solo unos minutos después del Big Bang, y aplicado el conocimiento en física nuclear de su época para describir un universo esencialmente compuesto por protones, neutrones y electrones, explicando así las abundancias de helio-4 en el universo actual por medio de la nucleosíntesis primordial. Rebobinando, por así decirlo, la película del universo hasta algo menos de una millonésima de segundo después del Big Bang, las condiciones de temperatura y densidad impedirían la formación del protón o el neutrón, liberando las partículas elementales que, hasta donde los físicos pueden probar hoy, las componen: los quarks. El universo estaría entonces compuesto por quarks y partículas como el electrón y otras de su misma familia, llamadas genéricamente *leptones*. Describir entonces el universo primordial requeriría de la física de partículas elementales.

La física de partículas elementales no solo se ocupa de los constituyentes últimos de la materia; la descripción de las interacciones entre esos constituyentes es también crucial. Los físicos habían identificado cuatro fuerzas fundamentales. A saber, la fuerza nuclear fuerte con la que interaccionan y se ligan los quarks entre sí; la fuerza nuclear débil, responsable de una forma débil de interacción entre quarks y leptones, independientemente de su carga eléctrica; la fuerza electromagnética de Maxwell, responsable de la interacción entre partículas cargadas; y por último, la gravedad reformulada por Einstein. Toda interacción en la naturaleza es, en última instancia, el resultado de la acción de alguna de estas fuerzas. La física de partículas había desarrollado una teoría de las interacciones con un nuevo formalismo matemático, que integraba la mecánica cuántica y la relatividad especial en una teoría de campos, denominada *teoría cuántica de campos*. En esta teoría, las interacciones eran el resultado de imponer ciertas simetrías fundamentales a la naturaleza y se expresaban por medio del intercambio de otras partículas, llamadas *bosones de interacción*. De ese modo, a mediados de la década de 1970, se describieron de manera compacta y consistente tres de las cuatro fuerzas fundamentales, las fuerzas nucleares fuerte y débil y el electromagnetismo, ensambladas en una única teoría que se conoce como *modelo estándar* de la física de partículas.

Pero los físicos de partículas fueron *más allá* del modelo estándar. Aunque describía con una precisión jamás antes conocida todos los datos experimentales de su ámbito, por diferentes razones, la estructura de la teoría parecía sugerir que se derivaba de otra teoría más fundamental, que debía unificar las tres fuerzas en una sola. Esta teoría se conoce como *gran unificación*. Actualmente, los físicos siguen trabajando en diferentes variantes para esta teoría, sin que ninguna de ellas produzca resultados concluyentes. Pero esta no puede ser aún la teoría final, la *teoría del todo*. La cuarta fuerza, la gravedad, también debe ser incorporada al esquema de unificación. De cualquier modo, las implicaciones cosmológicas de la unificación de fuerzas resultaron ser muy importantes. Veamos por qué, brevemente.



Tanto si nuestro universo está integrado dentro de un multiverso  
de tipo I, como si forma parte de un multiverso de otra clase,  
una cuestión que ha dado pie a muchas especulaciones,  
una de que configuraciones pueden adoptar la  
materia, la radiación, o lo que exista en ella,  
la existencia de los agujeros negros,  
la posible existencia de túneles  
conectando universos entre sí.



En el instante del Big Bang, las cuatro fuerzas fundamentales debieron estar unificadas. La expansión del universo y su consecuente enfriamiento provocaron, primero, el desacoplamiento casi inmediato de la gravedad. Algo que debió ocurrir  $10^{-40}$  segundos después del Big Bang, cuando la escala de distancias del universo hacía la gravedad igual de intensa que el resto de fuerzas. Posteriormente, transcurridos  $10^{-37}$  segundos desde el Big Bang, se desacoplaría la fuerza nuclear fuerte de las otras dos. La expansión y el enfriamiento del universo continuarían hasta una billonésima de segundo después del Big Bang, instante en el que se desacoplaría la fuerza débil de la electromagnética y se establecerían las cuatro fuerzas del modelo estándar.

El desacoplamiento de una fuerza implicaría la transición de un universo más simétrico a otro menos simétrico. Cuando dos fuerzas se unifican en una sola, esta última está asociada a una simetría mayor que engloba a las simetrías asociadas a cada una de las dos fuerzas unificadas. A la inversa, el desacoplamiento se debe a la ruptura de la simetría mayor, proceso que ocurriría en el universo como resultado de su expansión y enfriamiento. De algún modo, que los físicos de partículas pueden describir con sus ecuaciones, el estado de mínima energía (y preferible por tanto) del universo es el más simétrico cuando está caliente, y es el menos simétrico cuando se enfría. Así pues, el desacoplamiento de una fuerza es un proceso de transición cuántica entre estos dos estados.

Alan Guth estudió el desacoplamiento de la fuerza nuclear fuerte de las otras dos en los primeros instantes del universo primordial, e hizo dos importantes observaciones. La primera fue que el universo en el estado más simétrico, con las tres fuerzas unificadas, se comportaría como De Sitter había predicho que lo haría un universo dominado por la constante cosmológica. Es decir, se expandiría exponencialmente rápido. La segunda fue que la ruptura de la simetría generaría burbujas del universo menos simétrico en el seno del universo más simétrico. La expansión acelerada del espacio se detendría dentro de la burbuja. Guth sugirió que el universo en el estado simétrico desencadenaría la fase inflacionaria y que las burbujas generadas por la ruptura de

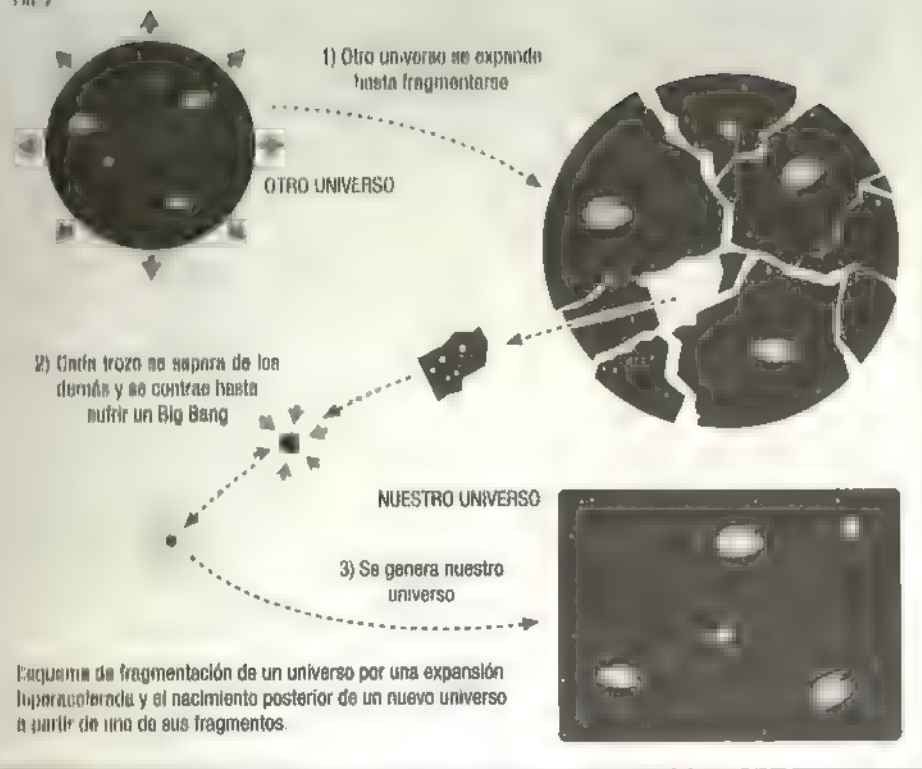
simetría acabarían fusionándose y llenando el espacio, poniendo fin a la inflación.

Sin embargo, el mecanismo propuesto por Guth no era del todo satisfactorio. En particular, el crecimiento y fusión de las burbujas no parecía poder cumplir su cometido de llenar todo el espacio. Andrei Linde, en 1982, propuso un mecanismo alternativo cuyos detalles son complejos, se basan en la postulación de una nueva partícula llamada *inflatón*, y cuya principal consecuencia es que, en puntos aleatorios del espacio-tiempo del universo simétrico, se produce una ruptura de simetría y se crea una burbuja. Cada una de estas burbujas es la semilla de un universo nuevo. El proceso es aleatorio, caótico y eterno. Es decir, están produciéndose universos embrionarios continuamente y sin ninguna regularidad. También se ha sugerido que el inflatón podría iniciar un nuevo Big Bang en algún punto aleatorio de un universo previo o que, incluso, una expansión hiperacelerada podría fragmentar ese universo previo, generando nuevos universos a través de la contracción gravitatoria de algunos fragmentos y un posterior Big Bang (figura 2).

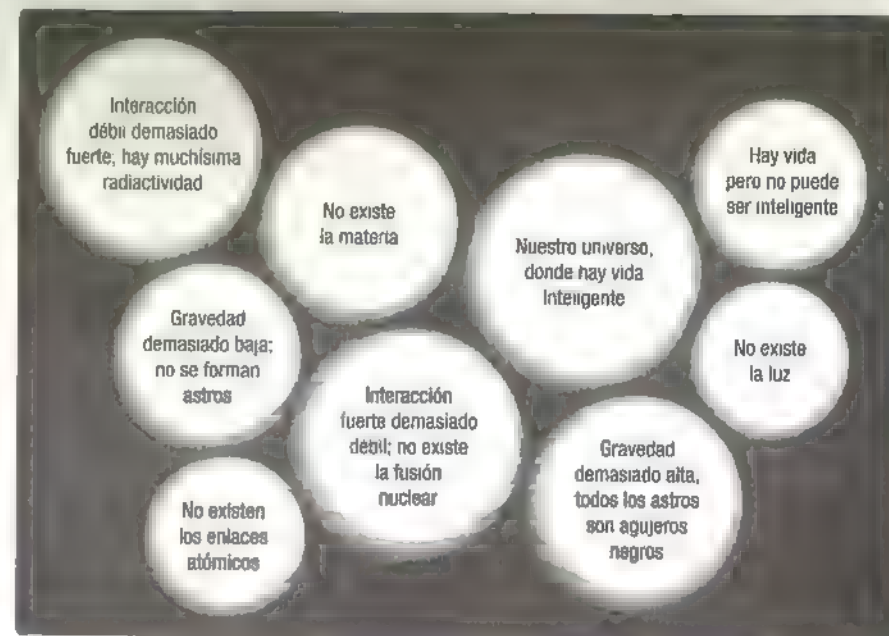
En la mayor parte de los universos que nacieran, la inflación producida no bastaría para «aplanarlos» lo suficiente y generar una densidad ajustada a su valor crítico. En esos casos, puede que el universo se expandiese muy deprisa o se frenara igual de rápido para iniciar una contracción gravitatoria. Esos universos serían muy diferentes del nuestro. Sin embargo, los procesos de ruptura de simetría y los nacimientos de nuevos universos continuarían aleatoriamente y, por último, con una frecuencia dictada por las leyes de la probabilidad, aparecerían algunos en los que la inflación sí habría durado lo necesario para crear nuestro universo. O uno similar. Cada uno de ellos sería un multiverso de tipo I, como los que acabamos de describir.

El conjunto de todos los nuevos universos producidos por la ruptura de simetría en algún punto aleatorio de un universo simétrico o por un nuevo Big Bang a partir de un universo previo constituirá un multiverso de tipo II.

El multiverso de tipo II y la aplicación del principio antrópico resuelven la paradoja del delicado ajuste de ciertas constantes



fundamentales a ciertos valores críticos. La densidad es solo un ejemplo. Pensemos, por ejemplo, en la intensidad de las interacciones. Si la fuerza nuclear fuerte fuese ligeramente más o menos intensa, las estrellas serían inestables o el deuterio lo sería, hasta el punto de que no habría habido nucleosíntesis estelar. Y sin ella, tampoco vida. Parecidas consecuencias tendrían pequeñas variaciones en la intensidad de la fuerza electromagnética. Y podríamos seguir (figura 3). Sin embargo, en cada burbuja del multiverso II, con su particular ruptura de simetría, las constantes fundamentales adquieren diferentes valores. Los valores críticos son muy improbables pero, cuando se dan, hacen posible un universo como el nuestro en el que la vida inteligente



En los diferentes universos de un multiverso de tipo II, las constantes serían diferentes y darían lugar a mundos muy dispares, algunos sin materia o sin núcleos más pesados que el litio, otros sin radiación, o sin astros, etc. El nuestro resulta de valores críticos de esas constantes, pero solo es uno de muchos.

puede florecer (al menos en un caso conocido). Solo entonces alguna inteligencia puede interrogarse sobre la improbabilidad de estos valores. Resultar agraciado en una lotería es siempre un suceso improbable pero solo el improbable ganador se interroga sobre su buena suerte. Vivimos en un mundo improbable. De lo contrario no viviríamos en él.

## MULTIVERSOS

Acabamos de completar un breve recorrido por la visión que los físicos, con sus ecuaciones y sus teorías, nos ofrecen de nuestro



## MUNDOS MULTIDIMENSIONALES

Siempre ha existido la posibilidad de que el universo que vivimos sea solo uno de los muchos que existen. Pero ¿cómo serían los otros? ¿Serían mundos con más o menos dimensiones espaciales y temporales? ¿Serían mundos con leyes físicas diferentes? ¿Serían mundos con una estructura diferente? La respuesta a estas preguntas depende de la teoría que se adopte. En la teoría de la relatividad general, el universo es un continuo de cuatro dimensiones (tres espaciales y una temporal) que se curva debido a la presencia de la materia y la energía. En esta teoría, el universo es un todo único y no hay posibilidad de que existan otros mundos. Sin embargo, en la teoría de cuerdas, el universo es un espacio de dimensiones superiores (por ejemplo, 10 o 11 dimensiones) en el que las cuerdas se mueven. En esta teoría, es posible que existan otros mundos, pero son muy diferentes a nuestro mundo. En algunos casos, los otros mundos podrían ser muy similares a nuestro mundo, pero en otros casos podrían ser muy diferentes. En algunos casos, los otros mundos podrían ser muy similares a nuestro mundo, pero en otros casos podrían ser muy diferentes. En algunos casos, los otros mundos podrían ser muy similares a nuestro mundo, pero en otros casos podrían ser muy diferentes.

### Dimensiones enrolladas y teoría de cuerdas

La teoría de cuerdas sugiere que vivimos en un mundo que inicialmente contaba con 10 dimensiones, aunque por las tres espaciales y una temporal que percibimos. Las otras siete dimensiones se compactifican a una escala tan pequeña que las hace indetectables. El universo que conocemos se expande desde el Big Bang, expandiendo una y otra vez las dimensiones espaciales. Para un funambulista, caminar sobre una cuerda es como vivir en un mundo de una única dimensión espacial. Solo puede caminar hacia adelante o hacia atrás. En cambio, la hormiga percibe un mundo de dos dimensiones, pero solo puede moverse hacia adelante o hacia atrás y alrededor de la cuerda. Para el funambulista, en cambio, la dimensión espacial está enrollada a una escala que le resulta indetectable, no puede moverse sobre ella.

### ¿Vivimos en una brana?

La teoría de cuerdas sugiere que se podría explicar varios enigmas de la cosmología moderna, como la existencia de dimensiones «extra» (aparte de las 3+1) pero que no estén compactificadas, o la existencia de las fuerzas fundamentales. En este escenario, tres fuerzas o interacciones (la gravedad, la fuerza nuclear fuerte y la electromagnética) permanecerán confinadas en el espacio ordinario (en lo que se conoce como brana), a diferencia de la gravedad, que actuará no solo sobre las tres dimensiones del espacio ordinario sino también sobre las dimensiones extra. Esta acción de la gravedad, «escurriéndose» parcialmente hacia otras dimensiones, justificaría la debilidad de esta fuerza respecto a las otras tres en el espacio tridimensional corriente donde esas tres fuerzas están concentradas. El término *brana* se inspira en la membrana que separa dos espacios, pero puede ser un ejemplo de objeto bidimensional en un espacio tridimensional. Por analogía, nuestro universo residiría en una brana de tres dimensiones espaciales dentro de un multiverso con dimensiones espaciales de orden superior.

Cantidad de dimensiones del tiempo

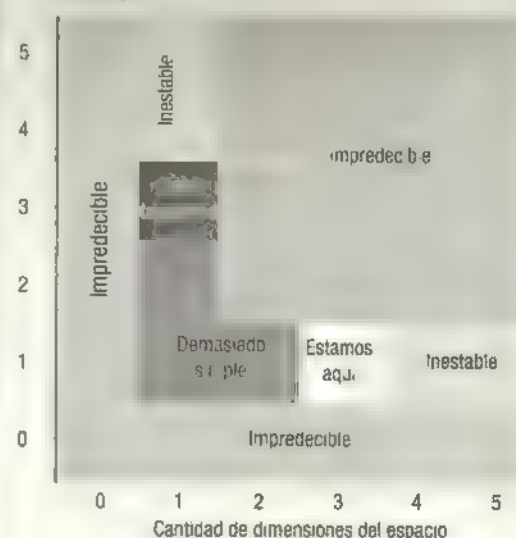
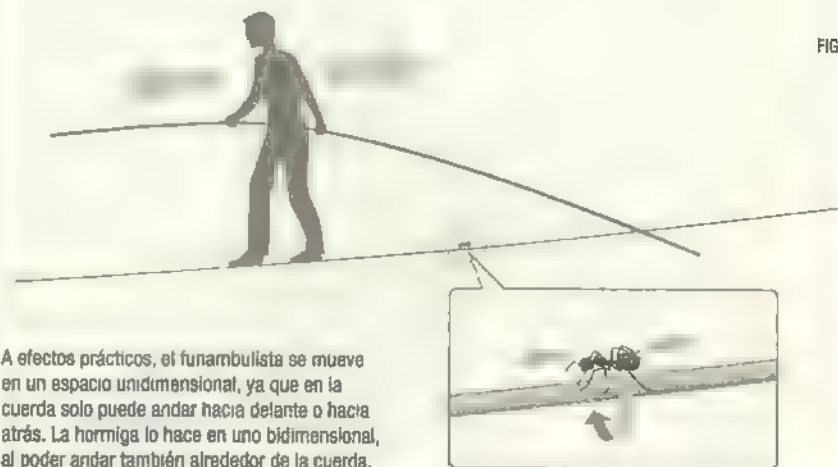


FIG. 1

Nuestro universo posee tres dimensiones espaciales y una de tiempo. Pero ¿cómo serían los universos que, por ejemplo, tuvieran una dimensión más del tiempo o una menos del espacio? Aquí se muestran las combinaciones de dimensiones del espacio y del tiempo desde 0 hasta 5. Muchas de ellas son inestables o improbables.



A efectos prácticos, el funambulista se mueve en un espacio unidimensional, ya que en la cuerda solo puede andar hacia delante o hacia atrás. La hormiga lo hace en un bidimensional, al poder andar también alrededor de la cuerda.

FIG. 2

universo. El mundo microscópico regido por las leyes cuánticas y el mundo a gran escala gobernado por la gravedad, cuya historia primordial nos relata la cosmología moderna. Hemos aprendido que rebobinar esa historia y aproximarnos al origen conduce a la confluencia con el mundo cuántico microscópico. La física nuclear y la física de partículas nos han ayudado a detallar el relato. Relato que, aún, es incompleto. Las teorías de gran unificación y, sobre todo, la teoría del todo que unificaría las cuatro fuerzas, son una asignatura pendiente; pero resultan necesarias para entender ese primer instante, para que nuestras ecuaciones nos permitan describir la concentración infinita de masa y energía que, en el instante cero, lo inició todo. Ese universo con las cuatro fuerzas unificadas es el que describen las teorías de cuerdas. En él, el espacio pudo tener nueve dimensiones espaciales, aunque solo tres participaron de la expansión que originó el Big Bang. O puede, también, que toda la materia se concentre únicamente en el espacio tridimensional en el que vivimos. En un espacio de dimensión superior, el espacio tridimensional es una hipersuperficie. Es también posible que otras hipersuperficies (los físicos las llaman *branas*) distintas a la nuestra contengan otros universos paralelos, siendo el espacio de dimensión superior, precisamente, el tejido del multiverso de tipo II, en el que se gestan de manera eterna y caótica nuevos multiversos de tipo I.

La visión de los físicos es aún incompleta. No obstante, sus ecuaciones y sus formalismos apuntan hacia la existencia probable de estos multiversos. También el multiverso de tipo III, el multiverso cuántico. Este último es una mera consecuencia de una alternativa autoconsistente al formalismo y la interpretación física dominante de la mecánica cuántica. Aplicado al universo como sistema físico, como ha sugerido Stephen Hawking, y describiendo con la función de onda del universo su evolución y alternativas cuánticas desde el Big Bang, el multiverso cuántico engloba al multiverso de tipo II, que a su vez englobaba al de tipo I. En el contexto de esta función de onda del universo que describe su evolución, cabe interpretar la sugerencia de Laura Mersini-Houghton, que atribuye la mancha

fina en el fondo cósmico de microondas, que describimos en el primer capítulo, a la huella del entrelazamiento cuántico de dos universos paralelos, en proceso de desdoblamiento, acaecido unos 380 000 años después del Big Bang.

¿Vivimos en un cosmos que forma parte de una complicada y jerarquizada estructura de mundos con realidades que se desdoblan y se repiten? La física y los físicos no pueden ofrecer una respuesta concluyente, tan solo pueden afirmar que todo lo que sabemos sobre el universo, la materia que lo compone y sus leyes fundamentales es compatible con que así sea.



- ACZEL, A.D., *Entrelazamiento*, Barcelona, Booket Ciencia, 2012.
- BLANCO, D., *Schrödinger. Las paradojas cuánticas*, colección Grandes ideas de la ciencia, Barcelona, RBA, 2012.
- BLASCHKE, J., *Los gatos sueñan con física cuántica y los perros con universos paralelos*, Teià (Barcelona), Ediciones Robinbook, 2014.
- BYRNE, P., *The Many Worlds of Hugh Everett III: Multiple Universes, Mutual Assured Destruction, and the Meltdown of a Nuclear Family*, Oxford University Press, 2010.
- GARDNER, M., *Multiverses and Blackberries*, Nueva York, W.W. Norton & Company, 2003.
- GREENE, B. Y GARCÍA, J., *La realidad oculta. Universos paralelos y las profundas leyes del cosmos*, Barcelona, Editorial Crítica, 2011.
- KAKU, M., *Universos paralelos*, Girona, Atalanta, 2008.
- : *Hiperespacio*, Barcelona, Booket Ciencia, 2012.
- NAVARRO, J., *Heisenberg. El principio de incertidumbre*, colección Grandes ideas de la ciencia, Barcelona, RBA, 2012.
- VILENKIN, A., *Muchos mundos en uno*, Barcelona, Alba Editorial, 2009.

- acción 19, 21, 50, 57  
 agujero negro 66, 96, 97, 108, 118, 139  
 ajuste fino, problema del 9, 127, 128, 137  
 año-luz 82, 105, 114, 126, 129, 131  
 autoestado 54  
 autovalor 50, 54  
  
 base 47-48, 50, 55, 87  
 Big Bang 8, 9, 108-115, 117, 118, 120-129, 132, 136-138, 140, 142, 143  
 Big Crunch 115, 117, 128, 140  
 brana 140, 142  
  
 cantidad de movimiento 27-29, 31, 95  
 COBE, sonda 114, 126, 128  
 colapso de la función de onda 10, 46, 52, 54, 55, 57, 59, 62, 65, 68-72  
  
 constante cosmológica 98-100, 104, 116, 136  
 cuantización 17, 20-22, 24-27, 35, 52, 117  
 cuanto 21, 31  
 cuerdas, teoría de 8, 9, 12, 140, 142  
 cuerpo negro 17-21, 102, 122, 123, 125, 126  
  
 decoherencia cuántica 57, 58, 62, 64, 67, 69, 72-74  
 densidad 96, 97, 100, 101, 108, 118, 127-129, 132, 137, 138  
     de masa y energía 116, 127, 129  
     de probabilidad 40, 41  
 desigualdad de Bell 69  
 determinismo 8, 13, 26, 28, 38, 41-43, 46, 51, 52, 58, 59, 62, 63, 68, 69  
 distribución espectral 15, 18, 122-124, 126



dualidad onda-partícula 31-32, 34, 53

ecuación de Schrödinger 34, 35, 40, 41

ecuaciones  
de Einstein 18, 100, 108, 113, 114, 118, 127, 132  
de Maxwell 34, 48-52, 55, 58, 59

efecto  
Compton 31  
Doppler 102  
fotoeléctrico 20, 21, 67, 87

electromagnetismo 8, 9, 17-22, 34, 89, 91, 92, 102, 133, 136, 138, 140

electrón 8, 16, 17, 20-22, 24-27, 29-32, 33-36, 38, 40, 41, 48, 50, 52, 56, 62, 67, 87-89, 102, 116, 118-122, 124, 132

energía 15, 18-26, 29, 30, 35, 36, 38, 41, 48, 50, 54, 62, 86, 90, 95, 98, 99, 104, 107, 108, 113-116, 119, 120, 127, 129, 136, 142  
cinética 35, 119  
oscura 107, 108, 114, 115  
potencial 35, 36, 122

entrelazamiento cuántico 59, 62, 64, 67-71, 73, 74, 143

espacio  
curvatura del 12, 95-99, 113, 114, 116, 127-129  
de Hilbert 46-48, 52

espacio-tiempo 9, 97, 116, 117, 120, 137

espín 67, 68

estado  
cuántico 34-36, 39, 46-48, 50-52, 54-57, 59, 66

estacionario 23, 36, 47, 48, 50, 54

estados relativos 59, 60, 64, 65, 67

éter 89-91

fondo cósmico de microondas 10, 73, 74, 111, 117, 118, 123-126, 128, 129, 143

fotón 21, 22, 24, 31, 38, 62, 73, 82, 124, 125

frecuencia 18-20, 22, 24, 93, 126, 137

fuerza  
electromagnética *véase* electromagnetismo  
nuclear débil 133  
nuclear fuerte 133, 136, 138

función de onda 11, 16, 34-36, 38-40, 46, 48-52, 54-63, 65, 66, 68-70, 72, 142  
universal 58, 60-63, 66

geodésica 98

gran unificación, teoría de la 133, 142

gravedad 8, 66, 80, 81, 86, 94, 95, 97-100, 104, 107, 116-118, 120, 132, 133, 136, 139, 140, 142

hamiltoniano 50, 51, 55

horizonte  
cosmológico 124-126, 129  
problema del 124-126

Hubble  
burbuja de 12, 108, 129, 131, 132  
constante de 103, 108, 113, 114, 116  
ley de 103-105, 108, 115, 124, telescopio espacial 114

inflación 10, 117, 124-128, 136, 137  
caótica 132

inflatón 137

inmortalidad cuántica 66

interpretación  
de muchos mundos 43, 56, 60-64, 66, 67, 73, 77, 92  
ortodoxa 16, 17, 39, 46, 52, 57, 58, 62, 63, 65, 66, 68, 70

lente gravitatoria 96, 98

líneas espectrales 22, 23, 26, 103  
de absorción 102, 103  
de emisión 22

longitud de onda 23, 31, 32, 34, 102, 103

luz, velocidad de la 82, 85, 89, 90, 92, 99

masa  
gravitatoria 94, 95  
inercial 94, 95

materia oscura 116

modelo estándar 8, 9, 109, 114, 128, 132, 133, 136  
cosmológico 109, 114, 128, 132

momento angular 21, 22, 24, 25, 68

multiverso 8-12, 16, 62, 63, 66, 73, 113, 132, 134, 137-140, 142

neutrón 24, 116, 118-121, 132

norma 39, 51, 55

núcleo 21, 22, 24, 25, 30, 35, 41, 48, 52, 62, 97, 118-122, 139

nucleosíntesis  
estelar 119, 120, 138  
primordial 118, 119, 122, 132

número  
cuántico 21, 23-27, 30, 35, 36, 39, 40, 50  
de Avogadro 38

observable 12, 16, 46, 49, 50, 52, 54, 58

observador  
inercial 88-90, 93  
no inercial 93, 94

ondas 10, 11, 16, 18-23, 30-32, 34-36, 38-40, 43, 46, 48-63, 65-70, 72-74, 89, 91, 102, 103, 111, 117, 118, 123-126, 128, 129, 142, 143

operador 50, 51, 54, 55, 57  
de evolución 51, 57

órbita 21-24, 26, 30, 38, 40  
estacionaria 21, 24, 30

paradoja  
de Bentley 80, 84  
de Olbers 81, 83, 92, 129  
del gato de Schrödinger 56, 66  
EPR 67-69

Planck  
constante de 19-21, 24, 28-31, 41  
telescopio espacial 114

postulado  
de la medida 46, 54, 64  
limitado 19

postulados de la mecánica cuántica 46, 52, 54, 64, 65, 69

principio  
antrópico 9, 137, 140  
de causalidad 68  
de equivalencia 94  
de exclusión 36  
de incertidumbre 29, 30  
de localidad 67, 69, 72

protón 8, 17, 24, 116, 118-121, 132  
 radiancia espectral 18, 19  
 reducción cuántica no unitaria 54  
 regla de Born 32, 39, 41, 45, 46, 48, 49, 54, 65  
 relatividad  
   especial, teoría de la 8, 23, 68, 87, 95, 96, 126, 133  
   general, teoría de la 9, 12, 86, 87, 92, 93, 95, 99  
 sistema de referencia 82, 87, 88, 90-94  
 suicidio cuántico 66  
 superposición cuántica 59, 62, 66, 69, 72  
 unitario, unitariedad 12, 16, 51, 54-59, 62-64, 72  
 universo  
   oscilante 78, 115, 117  
   multidimensional 140, 141  
 variables ocultas 69  
 WMAP, sonda 73, 114, 128



# Universos paralelos

Una de las hipótesis más sorprendentes de la ciencia actual es la de que nuestro universo es solo uno de una infinitud de universos posibles. Este «multiverso» adopta diferentes formas: por ejemplo, una interpretación de la mecánica cuántica postula que cada posible estado de una partícula genera una realidad propia; por su parte, la teoría M imagina universos compactados en dimensiones superiores. Por muy extravagante que pueda parecer, la idea de multiverso da respuesta a algunos de los mayores misterios de la cosmología.

**José Rodríguez-Quintero** es profesor de física en la Universidad de Huelva.